

IB 131-2015/36

**Genauigkeit und Wiederholbarkeit der
Messung der Eisadhäsionsfestigkeit in einem
Zentrifugenprüfstand**

Marlon Skrowny, Martin Schulz



**Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik
Braunschweig**

Juli / 2015

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtzgemeinschaft
Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

IB 131-2015/36

**Genauigkeit und Wiederholbarkeit der Messung
der Eisadhäsionsfestigkeit in einem
Zentrifugenprüfstand**

Braunschweig, Juli, 2015

Der Bericht umfasst:

68 Seiten

Institutsleiter:
Prof. Dr.-Ing. M. Wiedemann



Leiter der Abteilung:
Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Monner



Verfasser:
Martin Schulz



Marlon Skrownny





Genauigkeit und Wiederholbarkeit der Messung der Eisadhäsionsfestigkeit in einem Zentrifugenprüfstand

von Marlon Skrowny
im Studiengang: Luft- und Raumfahrttechnik

Studienarbeit
an der Technischen Universität Braunschweig

Matr.-Nr.: 2990026

Erstprüfer:	Prof. Dr.-Ing. Michael Sinapius	(TU Braunschweig - iAF)
Betreuer:	Dipl.-Ing. Martin Schulz	(TU Braunschweig - iAF)

Bearbeitungszeitraum: 3,5 Monate

Abgabedatum am: 28.04.2015

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	IV
Nomenklatur	V
1 Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung.....	1
1.2 Zielsetzung	2
1.3 Stand der Technik und erste Vorarbeiten.....	2
2 Methodik.....	8
2.1 Ausarbeitung der Evaluierung.....	8
2.1.1 Methoden und Vorgehensweisen	8
2.1.2 Fehleranalyse	11
2.1.3 Schlussfolgerung.....	14
2.2 Versuchsvorbereitung.....	15
2.2.1 Probenträger	15
2.2.2 Erweiterung des Teststandes mit Sensoren	16
2.2.3 Referenzsystem	18
2.2.4 Vorversuche.....	19
3 Untersuchung des Zentrifugenprüfstands	26
3.1 Zugversuch statischer Proben	26
3.1.1 Versuchsablauf und Datenerhebung	26
3.1.2 Aufbereitung und Auswertung	27
3.2 Vergleichsmessung des Zentrifugenprüfstands	28
3.2.1 Versuchsablauf und Datenerhebung	28
3.2.2 Aufbereitung und Auswertung	28
3.3 Validierung des Zentrifugenprüfstands.....	29
3.3.1 Versuchsablauf und Datenerhebung	29
3.3.2 Aufbereitung und Auswertung	30
4 Zusammenfassung	35
4.1 Fazit	35
4.2 Ausblick	36
Anhang.....	39

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vereisung eines Probenträgers (Seitenansicht)	1
Abbildung 2: Rotorumsetzung von Laforte und Beisswenger.....	5
Abbildung 3: Vereister Dummy einer Profilnase [7].....	5
Abbildung 4: Zentrifuge	6
Abbildung 5: Rotor mit Welle und Lagern (CAD)	7
Abbildung 6: Schematische Darstellung der Zugkraftmessung	9
Abbildung 7: Zweite Version des Profils im Windkanal (Eisfrei)	10
Abbildung 8: Schematische Darstellung der Zeitverzögerung beim Lösen des Eises ..	11
Abbildung 9: Darstellung der Flugbahnlänge	12
Abbildung 10: Messfehler beim Ablösen durch Δt der Flugdauer.....	13
Abbildung 11: Matlab Interpolation der Drehzahl	14
Abbildung 12: Zeichnung der Trägerplatte.....	15
Abbildung 13: Hall-Sensor zur Drehzahl Bestimmung	17
Abbildung 14: Aluminiumnegativform und Silikonform	18
Abbildung 15: Vorrichtung zum Anfrieren der statischen Proben.....	19
Abbildung 16: Statisch aufgefrorenes Eis auf Probenträger.....	19
Abbildung 17: Beispiel für Vergleich Beschleunigungssensoren.....	21
Abbildung 18: Erste Version des Profils.....	22
Abbildung 19: Skizze zum Einfluss des Winkels um die Hochachse.....	22
Abbildung 20: Eisablagerung an der Profilnase	23
Abbildung 21: Bei unterschiedlichen Temperaturen gebildete Eisformen	24
Abbildung 22: Beispiel des Druckverlaufs über die Zeit	24
Abbildung 23: Gewicht des aufgesprühten Eises nach Sprühdauer.....	25
Abbildung 24: Statischer Zugversuch mit Linearmotor.....	26
Abbildung 25: Beispiel einer Messung (Kraft-Zeit-Diagramm)	27
Abbildung 26: Veränderter Probenträger mit verjüngter Vereisungsfläche.....	30
Abbildung 27: Abhängigkeit der Kraft zum Ablösen mit der Temperatur (inkl. Standardabweichung in Prozent).....	31
Abbildung 28: Vergleich der Standardabweichungen von Kraft und Eismasse	32
Abbildung 29: Vergleich statisch und sprühend aufgetragenes Eis (Annahme Kraft zur Fläche proportional)	33
Abbildung 30: Unterschiedliches Eindringen in die Oberflächenstruktur	33
Abbildung 31: Vergleich statisch und sprühend aufgetragenes Eis (Korrekturfaktor Kraft-Fläche: 1,55)	34

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Technische Daten der Beschleunigungssensoren	20
---	----

Abkürzungsverzeichnis

ATM	Engl. „Air Traffic Management“ (Flugverkehrsmanagement)
CAD	Engl. „computer-aided design“ (rechnerunterstütztes Konstruieren)
CS-25	Engl. „Certification Specifications for Large Aeroplanes“ (Zulassungsvorschrift für Großflugzeuge), EASA
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EASA	Engl. „European Aviation Safety Agency“ (Europäische Agentur für Flugsicherheit)
iAF	Institut für Adaptronik und Funktionsintegration der TU Braunschweig
NACA-Profile	Tragflächenprofile vom „National Advisory Committee for Aeronautics“
PLA	Polylactide (Polymilchsäure, synthetische Polymere)
SLD	Engl. „supercooled Large Droplets“ (Große unterkühlte Tropfen)
SuLaDi	Projekt „Supercooled Large Droplets Icing“ (Funktionaler Luftraumblock)

Nomenklatur

v_L	$\left[\frac{m}{s}\right]$	Luftgeschwindigkeit
l	$[m]$	Konstruktive Länge
G	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$	Fallbeschleunigung
A	$[m^2]$	Flächeninhalt
P	$[W]$	Leistung
R	$\left[\frac{1}{min}\right]$	Drehzahl
F	$[N]$	Kraft
ρ	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	Dichte
σ	$[MPa]$	Spannung

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Am Institut für Adaptronik und Funktionsintegration soll zur Erfassung der Adhäsionsfestigkeit von auf Oberflächen aufgesprühtem Eis ein Versuchsstand verifiziert werden. Dies geschieht in Bezug auf das Forschungsprojekt SuLaDI (Supercooled Large Droplets Icing). SuLaDI stellt das Leitprojekt der DLR@UNI Initiative am Standort Braunschweig dar. Es besteht aus acht Instituten. Darunter vier vom DLR und vier der TU Braunschweig. Zudem wird es durch die Helmholtz Gemeinschaft gefördert. Das Projekt befasst sich mit den Supercooled Large Droplets (SLD). Hiermit sind unterkühlte Wassertropfen mit einem Durchmesser von mehr als 50 Mikrometer gemeint. Diese entstehen bei bestimmten Wetterphänomenen und beeinträchtigen unter anderem den Flugverkehr. Die Supercooled Large Droplets frieren bei Berührung, zum Beispiel auf den Tragflächen, augenblicklich an der Oberfläche fest. Dabei bilden sich Strukturen, die die Strömung beeinträchtigen (Abbildung 1).

Das Thema Vereisung wird in der Zulassungsvorschrift CS 25 genau definiert, diese berücksichtigen bei permanenten Vereisungsbedingungen Tröpfchengrößen von 40 Mikrometern und bei periodischen 50 Mikrometern. Dadurch, dass es in der Vergangenheit zu Flugunfällen kam, die auf SLD ($> 50 \mu m$) zurückzuführen sind, wird es in naher Zukunft neue Flugzulassungsvorschriften durch die Zulassungsbehörde geben. Die Forschung in dieser Richtung wird somit zunehmend wichtig, zum einen, um sinnvolle Vorschriften zu definieren, und gleichzeitig Methoden zu entwickeln, um diese umzusetzen.

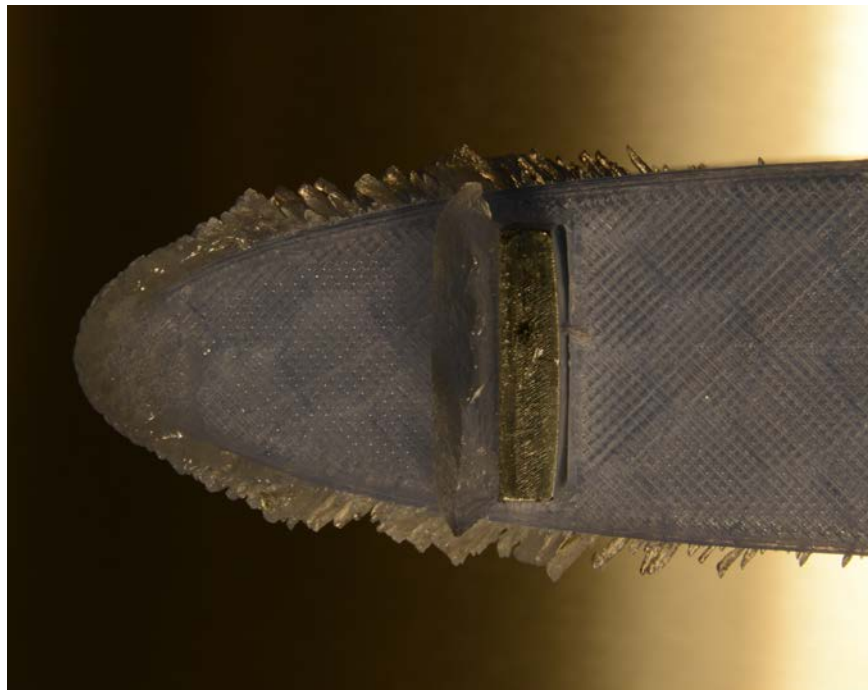


Abbildung 1: Vereisung eines Probenträgers (Seitenansicht)

1.2 Zielsetzung

Durch das steigende Interesse an der Thematik der Supercooled Large Droplets für eine erhöhte Sicherheit in der Luftfahrt untersucht das Institut für Adaptronik und Funktionsintegration unter anderem die Adhäsionsfestigkeit des aufgesprühten Eises an Oberflächen. Hierfür wurde ein neuer Versuchsstand konstruiert. Dieser nutzt die Zentrifugalkräfte, um das aufgesprühte Eis von einem Träger abzuscheren. Dabei wirken die Kräfte parallel zur Kontaktfläche. Hier soll die Güte der Verbindung zwischen Eis und Trägermaterial durch die Rotation hervorgerufenen Fliehkräfte erfasst und ausgewertet werden.

Das Ziel ist es, ein klar definiertes Verfahren zu haben mit dem wissenschaftliche Messungen gemacht werden. Der Verfahrensablauf sowie der Versuchsstand werden dazu untersucht. Zu allererst wird untersucht, ob die ausgegebenen Daten der Sensoren für den Zweck interpretiert werden können und verwertbar sind. Ist dies gegeben, wird der Versuchsstand auf Konsistenz und Reproduzierbarkeit untersucht. Dabei wird das Hauptaugenmerk bei der Untersuchung der Ergebnisse auf Genauigkeit und Gültigkeit gelegt. Somit kann gewährleistet werden, dass die Ergebnisse untereinander vergleichbar und die zu testenden Oberflächen in ihrer Effektivität bewertbar sind.

1.3 Stand der Technik und erste Vorarbeiten

Materialeigenschaften von Eis

Eis aus Wasser entsteht beim Temperaturübergang um 0 °C. Beim Gefrieren wird dem zu frierenden Medium Energie in Form von Wärme entzogen. Ab einem bestimmten Punkt kommt es zu einem Phasenübergang von flüssig zu fest. Dabei wird Wärme an die Umgebung, hier das restliche flüssige Wasser, abgegeben. Diese muss wieder entzogen werden, um das restliche Wasser zu gefrieren. Das Eis wird in zwei Arten unterteilt. Zum einen gibt es **Klareis**. Dieses bildet sich bei Temperaturen von 0 °C bis –10 °C. Die Klareisbildung ist durch die Temperatur nahe dem Nullpunkt bestimmt. Die Wärme, die beim Gefrieren von Wasser frei wird, lässt zuerst ein Wasserfilm entstehen. Dadurch entstehen nahezu keine Lufteinschlüsse. Klareis besitzt eine hohe Dichte (800 bis 950 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$). Zum anderen gibt es **Raueis**. Es bildet sich bei Temperaturen zwischen –12 °C und –20 °C. Dabei gilt, dass bei kleineren Wassertropfen Raueis schon bei höheren Temperatur entsteht. Der Unterschied zu Klareis sind hauptsächlich Lufteinschlüsse, die beim schlagartigem Gefrieren auftreten. Das Eis verliert durch die vielen Grenzflächen seine Transparenz. Die Dichte ist mit 600 bis 800 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ geringer. [1]

Durch die Lufteinschlüsse, die sich unter anderem auch am Übergang von Oberfläche zu Eis bilden können, ist es wahrscheinlich, dass die Adhäsion bei Klareis größer ist. Dies resultiert aus der kleineren effektiven Haftungsfläche und den vielen Eingetrachten Risskeimen.

Die **Adhäsion** besteht aus den Van-der-Waals-Kräften, elektrostatischen Wechselwirkungen und der Kapillarkraft. Sie ist bei der Interaktion zweier Oberflächen neben der Reibungskraft die wichtigste Kraft an der gemeinsamen Grenzfläche. Einflussfaktoren, die sich auf die Adhäsion auswirken, sind Oberflächenstruktur, Kontaktfläche und Oberflächenenergie [2].

Es gibt Theorien, die besagen, dass zwischen Eis und der vereisten Oberfläche eine flüssige Grenzschicht vorhanden ist. Diese ist bei 0°C am dicksten ($> 50\text{ nm}$) und wird mit abnehmender Temperatur dünner. Dies geschieht bis die Grenzschicht ab einer bestimmten Temperatur verschwindet. [3]

Statistik

Die Statistik ist eine in der Wissenschaft wichtige Disziplin. Statistische Methoden haben ein weitreichendes Einsatzgebiet. Es wird verwendet, um theoretische Überlegungen mit Erfahrungen (Empirie) zu verbinden. Daher findet man sie in den meisten Gebieten von den Naturwissenschaften bis hin zu den Geisteswissenschaften. Es gibt unterschiedliche Teilgebiete der Statistik. Darunter fallen die Deskriptive Statistik, die Explorative Datenanalyse, die Inferentielle Statistik und die Wahrscheinlichkeitsrechnung als Bindeglied der Deskriptiven und Inferentiellen Statistik. Für diese Arbeit ist die Deskriptive Statistik die ausschlaggebende Art. Sie beschäftigt sich mit der Gewinnung, Aufbereitung, grafischen Darstellung und der Beschreibung der Daten. Mithilfe geeigneter Darstellungsmethoden können Zusammenhänge gefunden oder bisher unbekannte Strukturen aufgezeigt werden. Dies unterstützt ausschlaggebend die Auswertung der Daten. Im Gegensatz zur Inferentiellen Methode werden keine stochastischen Modelle mit einbezogen. Dies hat den Nachteil einer fehlenden Fehlerwahrscheinlichkeit gegenüber der Aussage.

Wichtig bei der Statistik ist die Datenkontrolle. Im ganzen Prozess einer Untersuchung kann es zu Fehlern kommen. Zum Beispiel beim Erheben, dem Aufbereiten oder der Auswertung. Man unterscheidet zwei Hauptgruppen von Fehlern. Zum einen die statistischen Fehler, wobei die Abweichung immer dem gleichen Muster entspricht. Die andere Art sind die zufälligen Fehler. Hier sind die Abweichungen unvorhersehbar. Eine einfache und wichtige Anzeige des zufälligen Fehlers ist der sogenannte mittlere Fehler oder anders die empirische Standardabweichung. Bei einer Vollerhebung, wie sie in dieser Arbeit vorkommt, gibt es Erfassungs- und Inhaltsfehler. Beide sind teils zufällig und teils systematisch. Die Fehleranalyse beinhaltet Kontrollverfahren, wie die deskriptive und operative Kontrolle. Diese dienen der Vermeidung von Fehlern. Dabei sind die deskriptiven Verfahren zur nachträglichen Kontrolle und die operativen sind während des Erhebungsprozesses eingebaut. Zur Darstellung der Fehler dienen Fehlerrechnungen.

Typische Fehlerwerte sind zum Beispiel:

Absolute Fehler	$\Delta_i := x_i^* - x_i$
Relative Fehler	$\varepsilon_i := \frac{\Delta_i}{x_i}$
Fehlerfaktor	$f_i := (1 + \varepsilon_i)$

und der

Berichtigungsfaktor	$g_i := \frac{1}{f_i}$
---------------------	------------------------

x_i : der wahre Wert einer Größe X_i ; x_i^* : der systematisch fehlerbehaftete Messwert

Zur Präsentation der Datensätze dienen tabellarische graphische Mittel. Das bekannteste ist das Stab- oder Säulendiagramm sowie das Liniendiagramm. Die graphische Aufbereitung erleichtert das Verständnis der Datensätze. Dabei ist in jedem Fall die Angabe der Anzahl statistischer Einheiten n bzw. N wichtig. Dies erleichtert die Einschätzung zur Aussagekraft der Untersuchung. [4]

Als **Evaluationsmethoden** existieren zwei Modelle. Zum einen die formative Evaluation. Sie kommt in der Entwicklung und Auslegung zum Einsatz. Hierbei gibt es eine direkte Rückmeldung für das Projekt. Die zweite Methode ist die summative Evaluierung. Diese entspricht der in dieser Arbeit angewandten und wird bei vollständig entwickelten Systemen herangezogen. Das Hauptziel liegt nicht in dem Eingreifen in den Entwicklungsprozess, sondern in eine abschließende Beurteilung und Bewertung. [5]

Herangehensweisen von Dritten beim Abscheren mittels Zentrifuge

Verfahren mit dem Einsatz einer Zentrifuge wurde in der Vergangenheit schon mehrfach verwendet, um die Adhäsion und Anti-Icing Systeme und De-Icing Systeme zu untersuchen. Dabei ist das Grundprinzip des Lösens mittels Zentrifugalkraft immer dasselbe. Unterschiede gibt es in der Umsetzung der Zentrifuge und der Anbringung der Probe. In dem Versuch von C. Laforte und A. Beisswenger [6] ist der Rotor leicht zugänglich und wechselbar. Das Anfrieren geschieht entweder direkt auf dem Rotor an einer vordefinierten Stelle oder auf einem Träger der in den Rotor gespannt wird. Hier ist das Eis oben auf dem Rotor und wird nicht vor Luftkräften geschützt (siehe Abbildung 2). Dies könnte eine mögliche Fehlerquelle darstellen. Die Detektion der Zeit des Ablösens geschieht hier mittels Beschleunigungssensoren an der Außenwand.

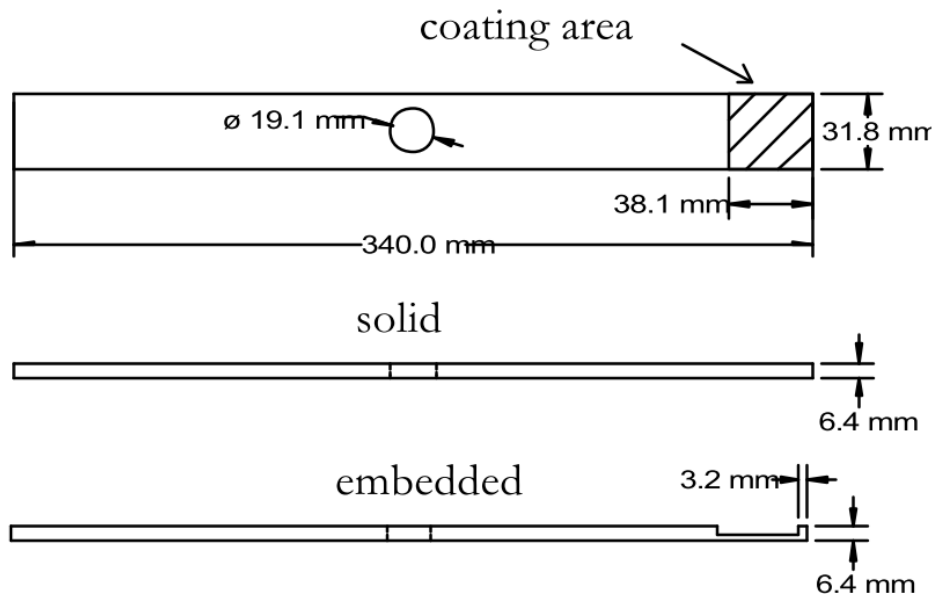


Abbildung 2: Rotorumsetzung von Laforte und Beisswenger

Andere Vorgehensweisen sehen eine Vereisung an der Stirnseite vor. Die Stirnseite ist in der Regel der Profilnase nachempfunden. So zu sehen bei der Arbeit von Brouwers und Peterson [7]. Sie untersuchen die Eisbildung, aber auch die Adhäsion von Eis an Windkraftanlagen oder Rotorblättern von Hubschraubern (siehe Abbildung 3).



Abbildung 3: Vereister Dummy einer Profilnase [7]

Die vorhandene Zentrifuge

Die verwendete Zentrifuge ist eine Eigenkonstruktion, die für den Scherversuch entwickelt wurde (siehe Abbildung 4). Sie besteht aus dem Grundgerüst, welches aus Vierkantprofilen besteht und einem Rohr, welches als Außenwand verwendet wird. In der Mitte der Konstruktion befinden sich die gefrästen Lagerböcke. Diese sind ausgedreht, nachdem die Konstruktion geschweißt wurde. Dies wurde gemacht, damit die Lager fluchten. Somit soll eine exakte Ausrichtung und Laufruhe des Rotors erreicht werden. Der Rotor wird mittels eines Riemens durch ein Servomotor mit einer

Übersetzung von 1:2 angetrieben. Somit kann eine maximale Drehzahl von 9000 Umdrehungen pro Minute erreicht werden.

Der Rotor besteht aus der Wurzel, dem Ausgleichgewicht und dem Ausleger an dem die Probe befestigt ist. Der Ausleger ist als Profil ausgeführt, um einen geringen Luftwiderstand aufzuweisen (siehe Abbildung 5). Die Spitze des Rotors, an dessen Kante das Eis sitzt, ist 250 mm vom Drehpunkt entfernt. Die Ansteuerung des Servomotors geschieht mittels eines Reglers, der eine gleichmäßige Beschleunigung gewährleistet. In dieser Arbeit wurde eine Beschleunigung von zwei Herz je Sekunde vorgegeben.

Die Besonderheit dieses Aufbaus ist, dass das Eis auf dem Probenträger in dem Profil versenkt wird. Dies hat den Vorteil, dass keine Kräfte aus dem Luftwiderstand auf das Eis wirken.

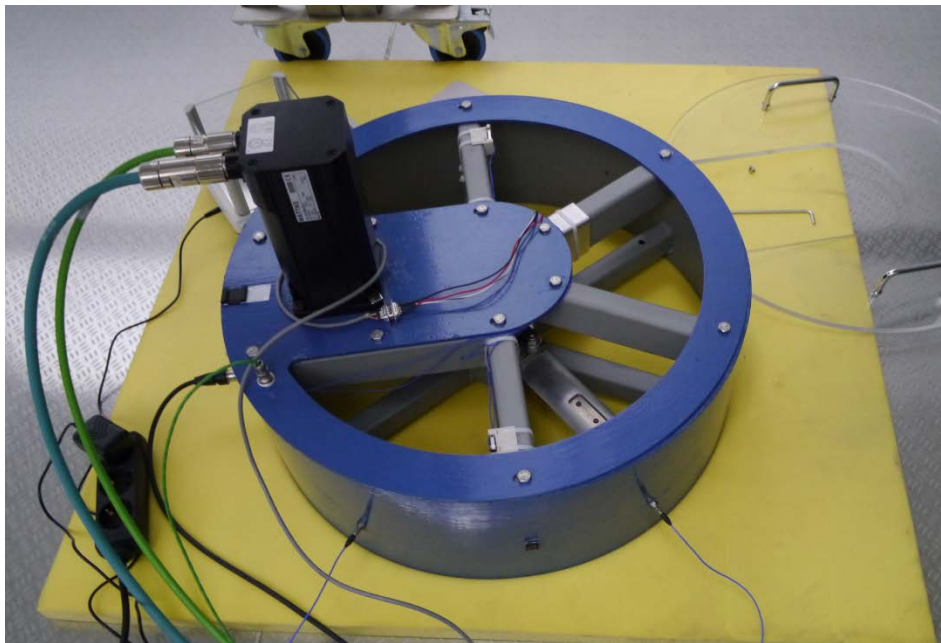


Abbildung 4: Zentrifuge

Die Zentrifuge wird für diese Arbeit noch erweitert. Dazu gehören zwei Sicherungsschalter, die dazugehörige Abdeckung aus Acrylglas, Beschleunigungssensoren und ein Temperatursensor. Zudem hat am Anfang der Regler Probleme bereitet, welche zuerst behoben werden mussten.

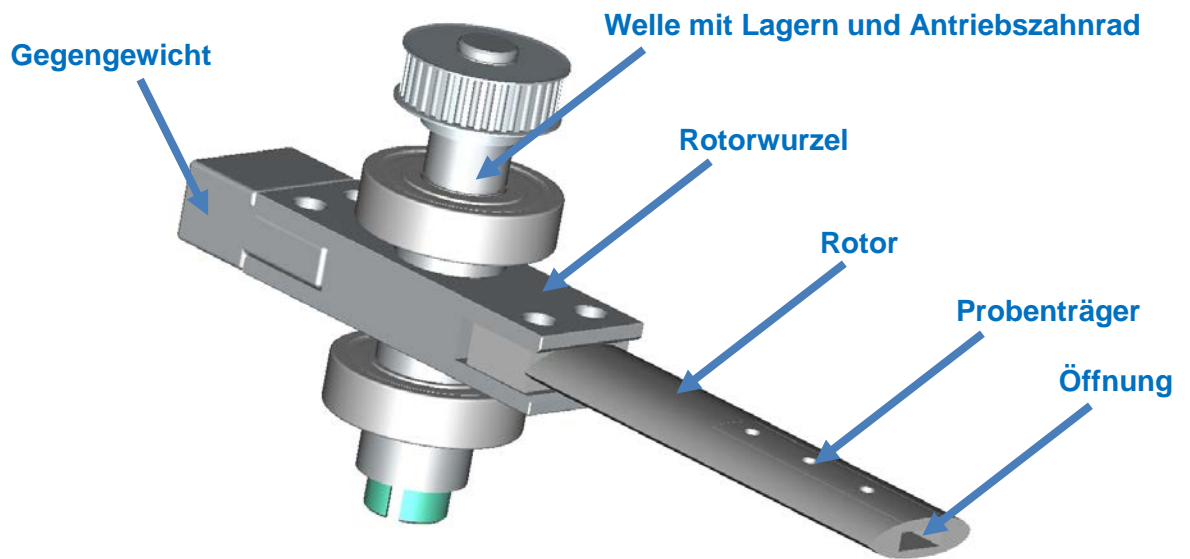


Abbildung 5: Rotor mit Welle und Lagern (CAD)

2 Methodik

2.1 Ausarbeitung der Evaluierung

In der vorliegenden Untersuchung ist die Analyse des neuen Teststandes im Fokus der Betrachtung. Zur Evaluierung wird die summative Methode eingesetzt. Es handelt sich dabei um eine Art der sogenannten Ergebnisevaluation. Dabei wird der vorhergesagte Zielzustand mit den realen Ergebnissen verglichen.

Bei der Evaluierung des Messstandes ist es sinnvoll, diese in drei Schritten durchzuführen. In den ersten beiden Schritten wird es darum gehen, das Verfahren unter größtmöglichen kontrollierten Bedingungen zu untersuchen. Hierbei wird darauf geschaut, in welcher Größenordnung die Kraft zum Lösen des Eises ist und wie gut die Zentrifuge diese reproduzieren kann. Der abschließende dritte Teil soll den eigentlichen Testverlauf betrachten.

Die erste Phase beschäftigt sich mit der praktischen Bestimmung der benötigten Kraft zum Abscheren des Eises vom Träger. Hierfür wird eine Kraftmessdose herangezogen. Für die benötigte Scherkraft ist die maximale Kraft zum Zeitpunkt der Ablösung des Eises entscheidend.

In dem zweiten und dritten Teil der Evaluierung, geht es um die Zentrifuge und deren Abscherwirkung. Hier werden die Eigenschaften der Zentrifuge im laufenden Betrieb untersucht. Einmal unter reproduzierbaren Bedingungen und einmal unter realen Testbedingungen, mittels Sprühversuch. Für eine Abschätzung der Genauigkeit der Messung und den Beweis ihrer Validität muss herausgefunden werden, ob es Störeinflüsse gibt und welchen Einfluss diese auf die Messwerte haben. Zudem muss während des Versuchs ein thermischer Schock verhindert werden, damit das zu prüfende Eis frei von Spannungen bleibt, die dadurch entstehen und zum Lösen beitragen können.

2.1.1 Methoden und Vorgehensweisen

Um eine Aussage zur Auswertbarkeit der Daten aus dem Testverlauf treffen zu können, muss die Wiederholbarkeit der Daten geprüft werden. Bei den Proben, die im Windkanal vereist werden, kann nicht sichergestellt werden, dass sich die entstehende Eisschicht bei allen Proben gleich aufbaut. Somit muss für das erste Referenzieren des Prüfstandes sichergestellt werden, dass die Proben die gleichen Anfangsbedingungen bereitstellen. Hierfür werden Proben herangezogen, die unter gleichen Bedingungen hergestellt werden. Dabei wird mithilfe einer Silikonform, auf dem Probenträger ein Eiskubus ruhend aufgefroren. Dieser hat die Maße $20\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$. Dabei erhält man eine Probe ohne Beeinflussung durch Lufteinschlüsse an der Kontaktfläche oder Schwankungen im Gewicht des Eises.

Bei dem eigentlichen Versuch wird der Probenträger mit dem aufgefrorenen Eis an der Spitze des Rotors der Zentrifuge, die mit in der Kühlkammer steht, versenkt und angeschraubt. Dadurch, dass Windkanal und Zentrifuge in der gleichen Kühlkammer stehen, kommt es zu keinen Temperaturschwankungen, bei denen es zwischen Träger und Eis zu Spannungen kommen kann. Während des Versuchsablaufes fährt die

Zentrifuge eine vorgegebene Beschleunigungsrampe ab. Die Beschleunigung beträgt zwei Hertz pro Sekunde. Dabei wirkt die Fliehkraft mit zunehmender Drehzahl stärker auf das Eis ein. Der Versuch wird gestoppt, sobald das Eis die Außenwand berührt. Dabei wird durch einen Beschleunigungssensor die entstehende Schwingung erfasst. Die anliegende Drehzahl der Zentrifuge wird zu diesem Zeitpunkt aufgezeichnet. Die Eismasse wird mittels einer Waage vor dem Versuch bestimmt. Aus diesen Daten lassen sich dann die wirkenden Kräfte berechnen, die benötigt wurden, um das Eis zu lösen. Das Eis auf dem Träger ist durch das Profil des Auslegers gegen die auftretenden aerodynamischen Kräfte abgeschirmt.

Referenzmessung

Für die Referenzmessung wird, wie gerade beschrieben, das Eis unter gleichen Bedingungen auf dem Probenträger aufgefroren. Das Eis muss auf einer vordefinierten Fläche von $20\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ aufgebracht werden. Diese soll an der Spitze des Probenträgers liegen. Hierfür wird eine Vorrichtung benötigt, mit der man die Stirnkanten gegen das zu frierende Wasser abdichtet. Zudem muss der Probenträger auf der Fläche nach hinten abdichtet werden. Das so entstehende eingefasste Volumen, wird mit destilliertem Wasser gefüllt und unter kontrollierten Bedingungen gefroren.

Das so aufgefrorene Eis wird auf zwei Arten untersucht. Zum einen wird durch eine einfache Zugkraftprüfung die Kraft bis zum Bruch ermittelt. Die Aufbringung der Zugkraft geschieht händisch. Zwischen Eis und der Kraftaufbringung wird eine Zugkraftdose geschaltet. Hier wird der Maximalwert genommen, den der Signalausgang kurz vorm Lösen ausgibt. Dabei muss beachtet werden, dass die Kraftaufbringung nicht ruckartig geschieht, um das Messergebnis nicht zu verfälschen. Die Ergebnisse dieser einfachen Messung sollen einen ersten Anhaltspunkt geben, in welcher Größenordnung die Kraft liegt.

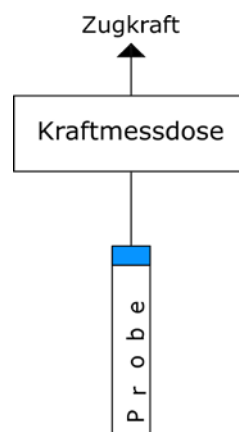


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Zugkraftmessung

Der zweite Ansatz ist die schon angesprochene Bildung einer reproduzierbaren Referenz mit dem angestrebten Versuchsverlauf. Hierbei wird der Probenträger mit dem standardisiert aufgefrorenem Eis in der Zentrifuge eingelegt. Der Versuchsablauf unterscheidet sich aus technischer Hinsicht von dem ursprünglich Angedachten. Die

maximal zu erreichende Drehzahl liegt zwischen 5700 1/min und 6200 1/min . In diesem Bereich sperrt der Regler und schaltet durch einen Überlastfehler den Servomotor aus. Der Grund hierfür konnte bisher nicht ermittelt werden. Zudem schaltet sich die Zentrifuge nicht beim Lösen des Eises ab, sondern fährt bis zur eingestellten Maximalgeschwindigkeit (6000 1/min) oder bis der Überlastfehler auftritt. Nach der Sichtung der Messdaten, wird der Zeitpunkt des Lösens ermittelt.

Versuch mittels dynamischer Besprühung

Zur endgültigen Validierung gehört noch die komplette Untersuchung des Versuchsverlaufs. Hierfür werden die zu prüfenden Probenträger in einem Windkanal mit destilliertem Wasser besprüht. Dies geschieht bei einer Luftgeschwindigkeit von $v_L = 36 \text{ m/s}$, beziehungsweise 80% der verfügbaren Leistung des Windkanals und bei einer Umgebungstemperatur von $T_U = -10^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$. Die Probe braucht eine definierte Kante nach hinten in Richtung der Bohrungen und die Grundfläche muss genau definiert sein (siehe Abbildung 12). Zudem darf der Träger zum Einspannen an den Flanken kein Eis ansetzen. Dies wird mittels eines Profils, welches im Luftstrom hängt, erreicht (siehe Abbildung 7). An der freien Seite des Profils wird der Träger versenkt, sodass 5 mm des Trägers vereisen.



Abbildung 7: Zweite Version des Profils im Windkanal (Eisfrei)

Nachdem der Träger vereist ist, wird wie bei der Referenzprobe mittels Zentrifuge der Probenträger untersucht. Der Träger mit dem Eis wird aus dem Profil entnommen und vor dem Einbau in der Zentrifuge zusätzlich gewogen, um die aufgebrachte Eismasse zu bestimmen. Die Kraft zum Lösen wird mittels der ermittelten Drehzahl und dem gemessenen Gewicht des Eises errechnet. Hierbei wird zuerst die Winkelgeschwindigkeit berechnet (Gleichung 1). Mithilfe dieser und der Gleichung 2

kann dann die Kraft berechnet werden. Diese wird zur weiteren Auswertung zum Beispiel über die Kontaktfläche normiert werden.

$$\omega = 2\pi \times R \times \frac{1}{60s} \quad \text{Gleichung 1}$$

R : Drehzahl des Rotors [1/min]

$$F = m \times \omega^2 \times r \quad \text{Gleichung 2}$$

m : Eismasse [kg]; r : Radius der Umlaufbahn [m]

2.1.2 Fehleranalyse

Ein wichtiger Faktor für die Genauigkeit der Messung ist die zeitnahe Detektion des Lösens des Eises. Würde der Zeitpunkt durch verschiedene Faktoren weit vor dem Erfassen liegen, wäre die errechnete Geschwindigkeit falsch. In Abbildung 8 ist der zeitliche Fehler durch den zurückgelegten Weg des Eises nach dem Lösen dargestellt. Das Eis löst sich an Punkt 1 und bewegt sich in einer geraden Bahn Richtung Außenwand (2). Bis es am Punkt 3 auf die Außenwand trifft, vergeht die Zeit Δt . Dafür muss bewertet werden, welche Zeit noch akzeptabel ist und wie lange das Eis braucht, um gegen die Wand zu treffen.

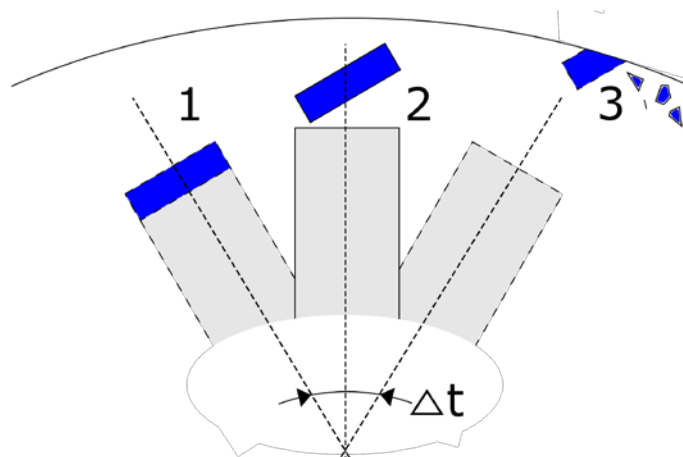


Abbildung 8: Schematische Darstellung der Zeitverzögerung beim Lösen des Eises

Der innere Radius der Außenwand der Zentrifuge beträgt 590 mm. Damit hat das Eis vor dem Lösen einen Abstand von 45 mm zu dieser. Bei der Flugbahn wird vereinfacht angenommen, dass diese dem letzten Impuls folgt und in einer geraden Flugbahn weiterfliegt (siehe Abbildung 9).

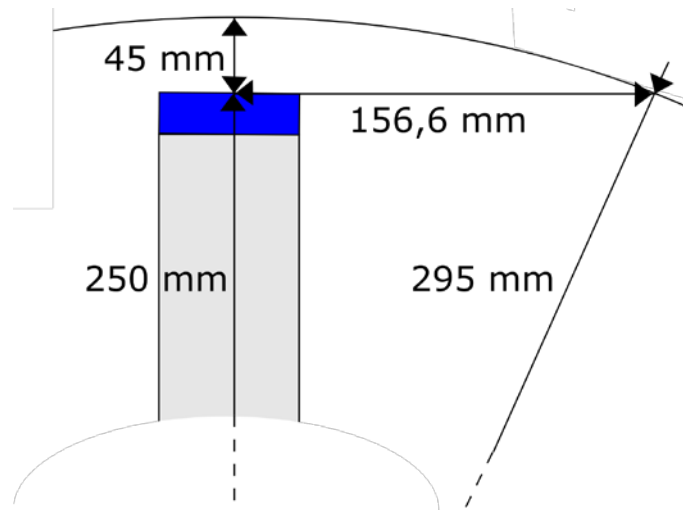


Abbildung 9: Darstellung der Flugbahnlänge

Dabei werden Störeinflüsse zum Beispiel von Luftverwirbelungen nicht beachtet. Mittels des Satzes des Pythagoras, resultiert eine Flugbahn der Länge $156,6 \text{ mm}$. Die Geschwindigkeit, mit der das Eis diesen Weg entlang fliegt, beträgt die der Rotorspitze (5000 1/min entspricht $130,9 \text{ m/s}$). Für die Bestimmung des Messfehlers muss zuerst die Geschwindigkeit für die einzelnen Drehzahlbereiche bestimmt werden. Durch diese Werte lässt sich die benötigte Zeit des Eises berechnen, die es für das Zurücklegen der $156,6 \text{ mm}$ ($0,1566 \text{ m}$) benötigt. Nun wird noch die Drehzahländerung bestimmt, die die Zentrifuge innerhalb dieser Zeit absolviert. Aus diesen Werten lässt sich der Messfehler für die einzelnen Drehzahlbereiche ermitteln. Hierfür wurden zwei Gleichungen verwendet. Zuerst wird die Drehzahl (R) mittels des bekannten Umfangs (U) in die Geschwindigkeit der Rotorspitze umgerechnet. Dies geschieht mittels der Gleichung:

$$v = \frac{R}{60} \times U \quad \text{Gleichung 3}$$

Im nächsten Schritt wird für jede Drehzahl die Zeit errechnet, die für $156,6 \text{ mm}$ (Flugbahn l) benötigt wird. Im gleichen Schritt wird nun die in der Zeit getätigte Drehzahlzunahme ermittelt. Die Gleichung lautet

$$\Delta U = \frac{l}{v} \times 120 \frac{1}{s} \quad \text{Gleichung 4}$$

Dieses Ergebnis wird mittels der aktuellen Drehzahl beim Lösen des Eises in einem Prozentwert umgerechnet. Zur besseren Veranschaulichung wird diese über die Drehzahl im folgenden Diagramm dargestellt (siehe Abbildung 10).

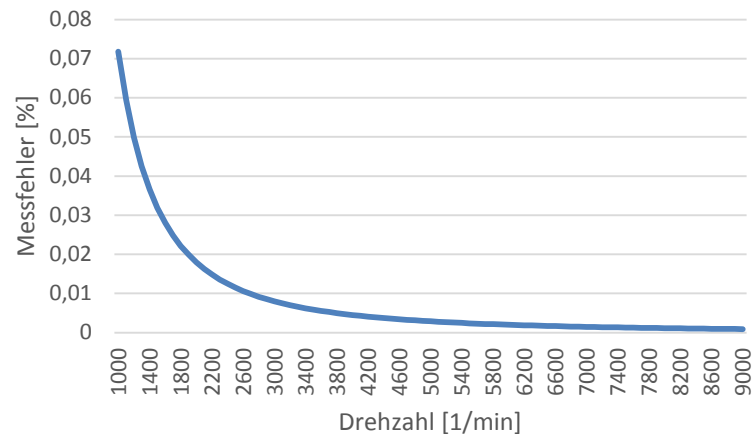


Abbildung 10: Messfehler beim Ablösen durch Δt der Flugdauer

Dieser Messfehler ist in Abbildung 10 Dargestellt. Schon bei niedrigen Drehzahlen von 1000 1/min liegt der Fehler bei 0,072 %. Der erwartete Punkt, bei dem sich das Eis löst, wird bei größeren Geschwindigkeiten erwartet. Diese liegen geschätzt bei 5000 1/min und unterliegen einem Fehler von 0,00287 % (0,14356 1/min). Dies ist vernachlässigbar klein, weil es einem Unterschied in der errechneten Kraft zum Lösen von 0,00118 N (bei 0,3 g Eismasse) entspricht.

Ein weiterer Faktor sind Abweichungen bei der Messung der Werte, die bei der Ermittlung der Kraft von Nöten sind. Diese entstehen durch Mess- oder Ablesefehler. Die Gleichung zur Kraft-Errechnung ($F = m \times \omega^2 \times r$) besteht aus drei Teilen. Zum einen die Masse m des Eises, diese wird manuell nach dem Aufbringen des Eises mittels einer Waage gemessen. Diese hat eine Ablesbarkeit von 0,001 g und eine Linearität von 0,003 g. Ein weiterer Faktor ist der Abstand r zum Drehmittelpunkt. Dieser ist bekannt und nicht variabel. Dennoch ist das Eis durch seine Dicke einem Kraftgradienten ausgesetzt. Dies bedeutet, dass an der Außenseite eine größere Kraft wirkt als an der inneren. Diese beiden Faktoren gehen einfach in die Fehlerrechnung ein. Die Auswirkung der letzten Größe hingegen, wirkt quadratisch in die Gleichung ein. Dies ist die Winkelgeschwindigkeit. Sie wird aus der Drehzahl errechnet, die wiederum durch den Hallsensor erfasst wird. Für die Berechnung wird das Signal des Sensors Interpoliert (siehe Abbildung 11).

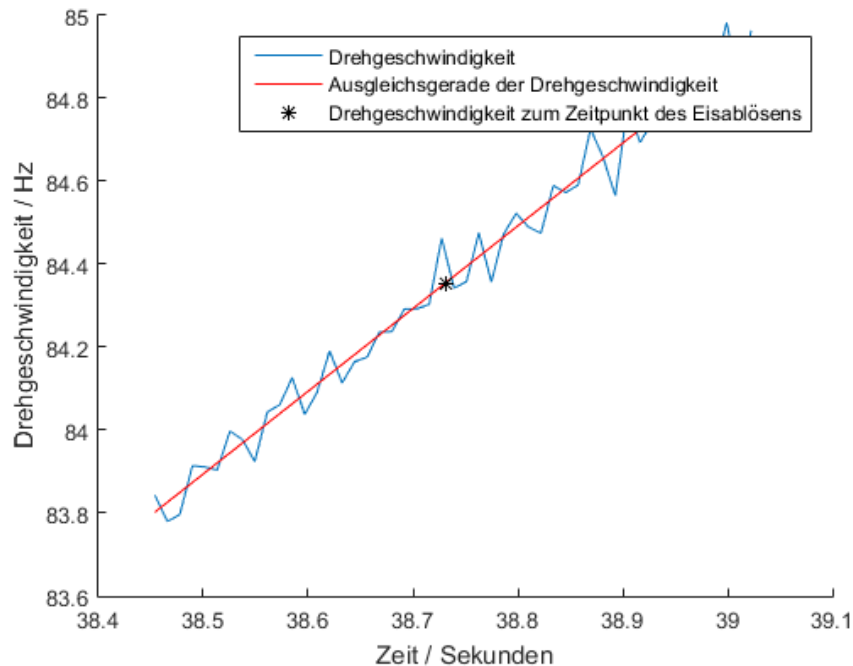


Abbildung 11: Matlab Interpolation der Drehzahl

Die Interpolation glättet das Drehzahlsignal, welches ein ungleichmäßiges Muster aufweist. Diese zackigen Muster können Messungenauigkeiten, aber auch Drehzahlschwankungen sein. Eventuelle Schwankungen in der Drehzahl können in der Regelung des Motors liegen.

Die Größenordnung der Einwirkungen der einzelnen Faktoren muss bewertet werden. Die Fehler sind alle systematisch. Im Falle der Masse ist die angenommene durchschnittliche Fehlergröße, bedingt durch die Linearität der Waage, von $0,003\text{ g}$. Das bedeutet bei einem Gewicht des Eises von $0,15\text{ g}$ bis $0,3\text{ g}$ einen Einfluss von maximal 2% auf die Kraft, durch die Linearität des Fehlers.

Bei der Winkelgeschwindigkeit sieht es hingegen anders aus. Die Veränderliche ist die Drehzahl aus der sich die Winkelgeschwindigkeit errechnet. In der Drehzahl herrscht zeitweise eine Ungenauigkeit von $0,3\text{ Hz}$. Diese entsteht durch die Ausgleichsgerade. Für die Winkelgeschwindigkeit wird dieser Wert mit 2π multipliziert. Dabei geht dieser Fehler, wie erwähnt, quadratisch in das Ergebnis der Kraft ein. Dies ergibt bei einer Drehzahl von 5000 1/min eine Abweichung von $1,38\%$. Ab einer Drehzahl von 3500 1/min ist der Fehler unter 2% .

Der Radius ist grundsätzlich konstant. Eine Veränderung kann nur durch die Verschiebung des Schwerpunktes geschehen. Dies kann durch das schräge aufwachsende Eis geschehen. Eine Verschiebung um einen Millimeter, verursacht eine Störung von $0,004\%$. Dies ist vernachlässigbar klein.

2.1.3 Schlussfolgerung

Bis hierher konnte nur eine theoretische Untersuchung stattfinden. Dabei werden nur systematische Fehler berücksichtigt. Die zufälligen Fehler werden erst bei praktischen

Versuchen deutlich. Zudem ist eine alleinige Untersuchung des vorgesehenen Versuchs ohne Referenz und Vergleichswerten, nicht sinnvoll. Es könnten keine qualitativen Aussagen getroffen werden. Erst mittels zusätzlicher Versuche, die eine Basis darstellen, wird dieses Defizit ausgeglichen. Hierdurch kann eine Aussage mit höherer Qualität und Genauigkeit getätigt werden. Erst dies ermöglicht eine endgültige Bewertung des Teststandes und des Versuchsablaufes.

2.2 Versuchsvorbereitung

Bevor die eigentlichen Versuche stattfinden können, müssen noch Vorbereitungen getroffen werden. Darunter fallen die Konstruktionen zur Referenzerzeugung und zum dynamischen Besprühen sowie Vorversuche, um das Verhalten besser einschätzen zu können.

2.2.1 Probenträger

Die Probenträger bestehen aus einer 4 mm starken Aluminiumplatte. Diese hat die Abmessungen von 20 mm × 100 mm. Die Aluminiumplatte dient allein als Träger für das aufzubringende Eis. Auf dessen Ende, welches im Versuch frei im Luftstrom hängt, wird das Eis aufgefroren. Die Aluminiumplatte hat drei Bohrungen. Zwei für die Positionierung mit Passstiften und eine für die Befestigung mittels einer Senkkopfschraube. Die zu vereisende Fläche beträgt 20 mm × 5 mm und wurde mittels Schleifpapier der Körnung 2500er nachbearbeitet.

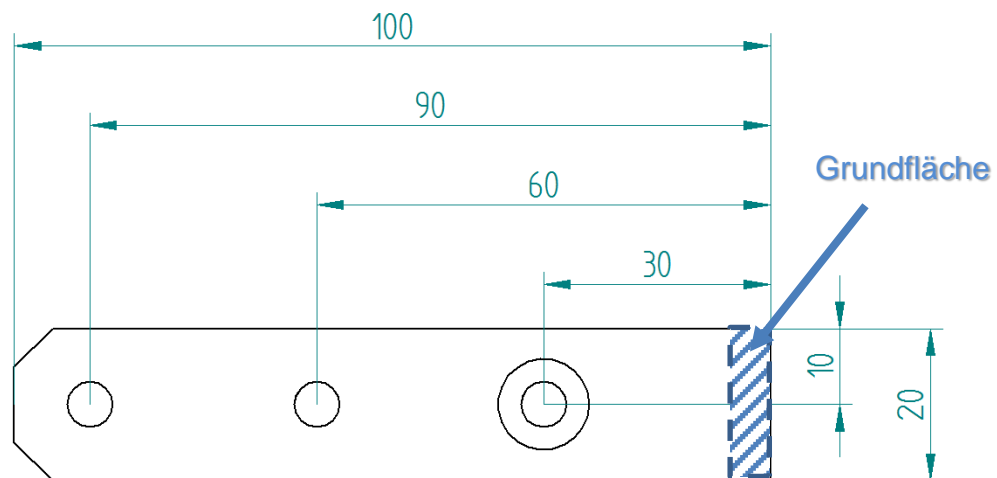


Abbildung 12: Zeichnung der Trägerplatte

Der einfache Aufbau der Proben ermöglicht einen flexiblen Einsatz und eine einfache Vervielfältigung der Probenträger. Dabei wird versucht, die realen Bedingungen von Supercooled Large Droplets beim Gefrieren möglichst realistisch nachzustellen. Bei den Vorversuchen wird durch ein anderes Vereisungsverfahren die Reproduzierbarkeit des Teststandes validiert. Hierbei wird zum Vereisen ruhendes Wasser verwendet, um es auf der Oberfläche anzufrieren. So werden eventuelle Lufteinschlüsse zwischen Eis und der Trägerfläche verhindert. Diese könnten damit auf die Adhäsion einwirken. Eine

veränderte Fläche wird die Beurteilung über die Gleichmäßigkeit der Messung beeinflussen. Dies soll bei der Referenzmessung vermieden werden.

2.2.2 Erweiterung des Teststandes mit Sensoren

Der vorhandene Regler bietet keine Schnittstelle um die aktuelle Drehgeschwindigkeit extern zu verarbeiten. Diese ist für die spätere Bestimmung der Kraft jedoch zwingend erforderlich. Auch für die Bestimmung des richtigen Zeitpunktes des Ablösens werden zusätzliche Sensoren benötigt. Für beide Messwerte werden externe Sensoren verwendet. Die genaue Bestimmung der Geschwindigkeit kann durch das Erfassen der Position des Rotors geschehen. Hierbei wird an einem fixen Punkt erfasst, wann der Rotor sich an dieser Stelle befindet. Hierbei kann durch die benötigte Zeit zwischen zwei Durchläufen die Drehzahl ermittelt werden. Es gibt mehrere Möglichkeiten dies zu messen. Neben der Verwendung einer Lichtschranke oder passiven optischen Sensoren, gibt es die Möglichkeit, mittels magnetischer Erfassung durch einem Hall-Sensor die Drehzahl aufzuzeichnen. Die Entscheidung fiel auf einen speziellen Hall-Sensor (55505 Hall Effect Flange Mount Geartooth Sensor der Firma HAMLIN, siehe Abbildung 13), der normalerweise zur Detektion der Drehgeschwindigkeit von Zahnrädern dient. Dieser hat einen eingebauten Magneten und benötigt zum Auslösen des Signals lediglich eine ferromagnetische Oberfläche. Zudem besitzt der Sensor einen eingebauten 10bit Analog/Digital Wandler, der das Signal in ein Rechtecksignal umwandelt. Als Auslöser wird das Gegengewicht des Rotors verwendet, auf dessen Oberseite ein dünner Stahlstreifen geklebt wird. Die Wahl fiel aus zwei Gründen auf dieses Bauteil als Detektionsfläche. Zum einen ist das Gegengewicht die breiteste Stelle des Rotors und zum anderen ist die Umlaufgeschwindigkeit durch den kleinen Radius geringer. Dadurch wird das Signal, welches bei einer Umdrehung entsteht, vergrößert. Durch die Maßnahmen wird das Signal auf ein zwölftel der Umlaufzeit gestreckt. Dieses Vorgehen ist notwendig, um die benötigte Abtastrate gering zu halten.

Die Abtastrate muss groß genug sein, um sicherzustellen, dass das kurze Signal auch bei der maximalen Rotorgeschwindigkeit erfasst wird. Diese liegt bei 9000 1/min , was 150 Hz entsprechen. Bezieht man die Signallänge pro Umlauf ($1/12$) mit ein, liegt die Signalfrequenz bei 1800 Hz . Damit das Signal sauber detektiert werden kann, wird hier das Nyquist-Shannon-Abtasttheorem eingesetzt. Dieses besagt, dass die Abtastfrequenz mindestens doppelt so hoch sein muss. Dadurch werden mindestens 3600 Hz benötigt. Es wird eine Abtastung mit dem Faktor drei angestrebt und damit eine endgültige Abtastrate von 5400 Hz .

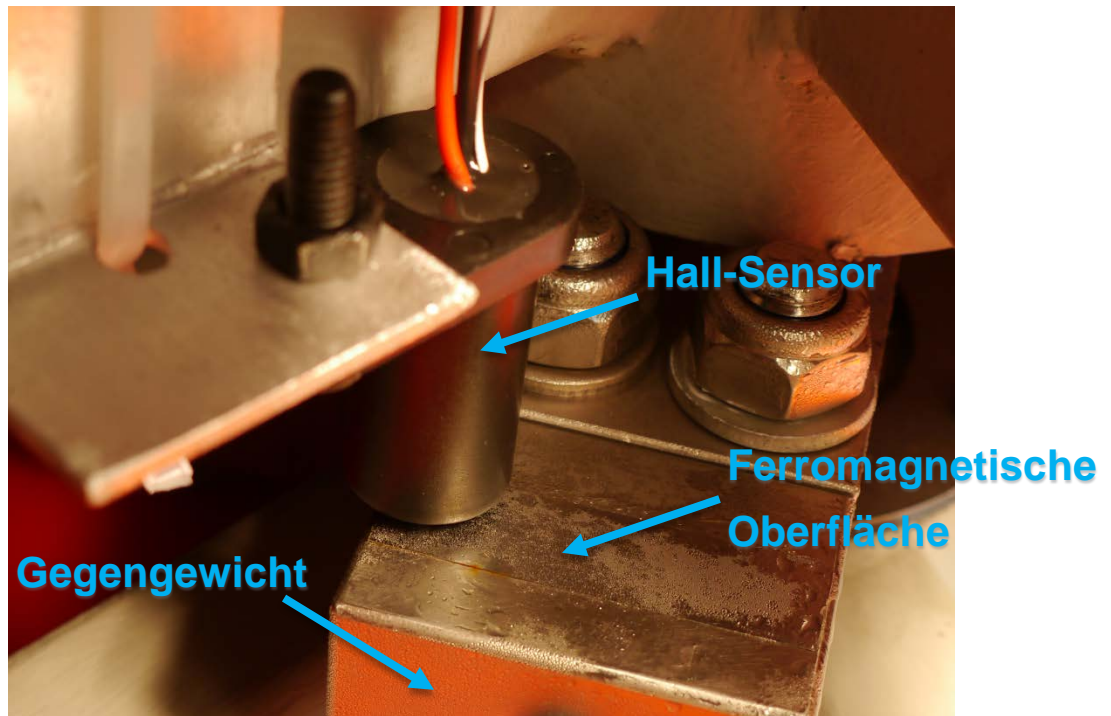


Abbildung 13: Hall-Sensor zur Drehzahl Bestimmung

Diese Methode hat den Nachteil, dass nur ein Signal pro Umdrehung erfasst wird. Somit könne Geschwindigkeitsänderungen während einer Umdrehung nicht erfasst werden. Die spätere Einbindung in die Infrastruktur des Windkanals birgt eine zweite Fehlerquelle. Die Abtastrate des Leitstands ist limitiert auf 10 kHz . Dies ist bedingt durch die verbaute Messtechnik. Hiermit lässt sich zwar sicherstellen, dass das Signal erfasst wird, aber nicht welche Stelle des Signals. Dies kann die Ergebnisse verfälschen.

Die Detektion des Zeitpunktes an dem sich das Eis löst, ist etwas komplizierter. Hierfür ist ein Beschleunigungssensor vorgesehen. Dieser soll den Aufprall des Eises auf der Außenwand aufzeichnen. Durch die Härte des Eises und die Steifigkeit der Schweißkonstruktion, wird beim Aufprall des Eises eine hohe Frequenz erwartet. Die Amplitude des Signals wird mit dem Impuls, das heißt mit der Geschwindigkeit und dem Gewicht des Eises steigen. Zwei Arten der Erfassung durch den Beschleunigungssensor sind denkbar. Zum einen die Erfassung des Peaks und zum anderen die veränderte Frequenz. Für die Erfassung des Peaks muss dieser größer sein als die Grundvibration der laufenden Zentrifuge. Zudem kann ein zu kurzer Peak bei zu geringer Abtastrate nicht aufgezeichnet werden. Bei einer unerwartet kleinen Amplitude, die nicht aus dem Grundsignal der laufenden Zentrifuge ablesbar ist, kann das veränderte Frequenzspektrum herangenommen werden. Die Erfassung durch die Veränderung der Frequenzanteile ist von der Abtastrate abhängig. Hier werden höhere Frequenzen ($> 10\text{ kHz}$) erwartet. Vorversuche werden aufzeigen, mit welcher Art Signal zu rechnen ist. Diese Vorversuche werden mit dem VibPilot der Firma m+p international durchgeführt. Diese Messhardware hat eine Abtastrate von $102,4\text{ kHz}$. Somit können auftretende Frequenzen von $51,2\text{ kHz}$ untersucht werden, ohne dass Informationen verloren gehen. Mit diesem Messsystem wird auch das

Geschwindigkeitssignal aufgezeichnet. Somit wird man die Flanken des Signals für die Validierung erfassen können.

Es stehen drei verschiedene Arten von Beschleunigungssensoren zur Verfügung. Die Sensoren haben neben der unterschiedlichen Größe auch verschiedene Messbereiche und Empfindlichkeitsbereiche. In einem Vorversuch wird der Sensor ermittelt, der die besten Ergebnisse für die Aufgabe liefert. Dies geschieht in Kapitel 2.2.4.

2.2.3 Referenzsystem

Das Referenzsystem soll einen ersten Eindruck der gemessenen Größen geben und erste eventuelle Fehler in der Ausführung aufzeigen. Dabei ist die eigentliche Referenz die Art des Gefrierens auf den Probenträger. Die gemessenen Werte werden als Basis verwendet und mit denen des geplanten Versuchsverlaufes verglichen.

Vereisungsvorrichtung

Zur Referenz-Vereisung wird eine Form benötigt, die das Wasser bis zum Gefrieren auf der vorgegebene Position hält und sich danach gut trennen lässt, ohne Kraft auf das Eis aufzutragen. Hierfür wird eine Negativform aus Aluminium gefräst, welches einen Teil des Trägers mit dem Eiskwürfel abbildet (siehe Abbildung 14). In dieser wird dann die Silikonform gegossen, mit dessen Hilfe das Anfrieren erfolgen kann.

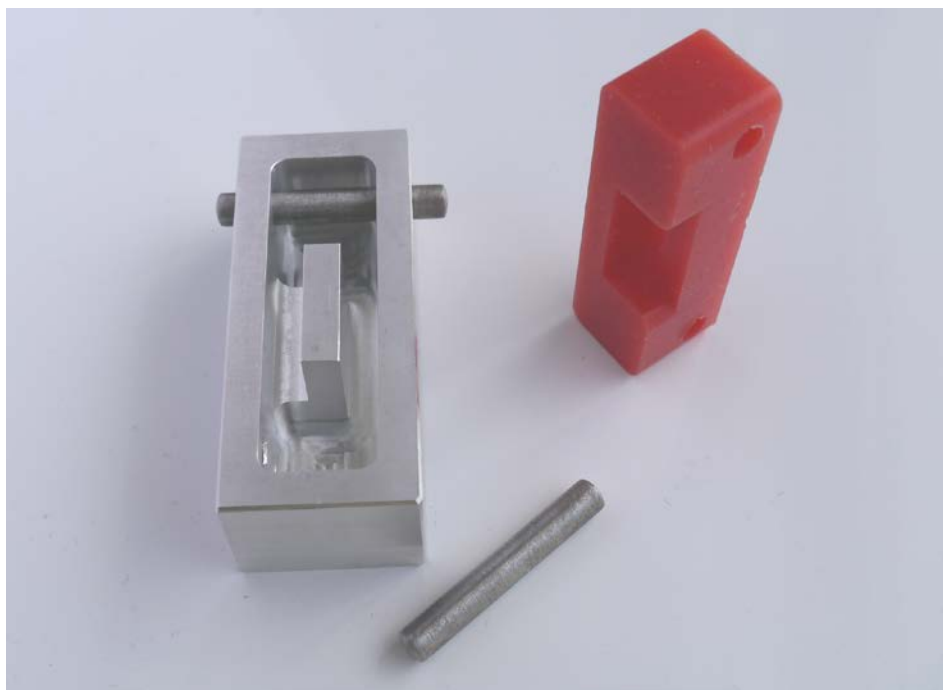


Abbildung 14: Aluminiumnegativform und Silikonform

Die so erhaltene Silikonform hält nicht selbstständig an dem Träger, sodass es Wasserdicht abschließt. Hierfür wird ein äußeres Gerüst benötigt (siehe Abbildung 15), welches den Träger und die Silikonform zueinander in Position hält.

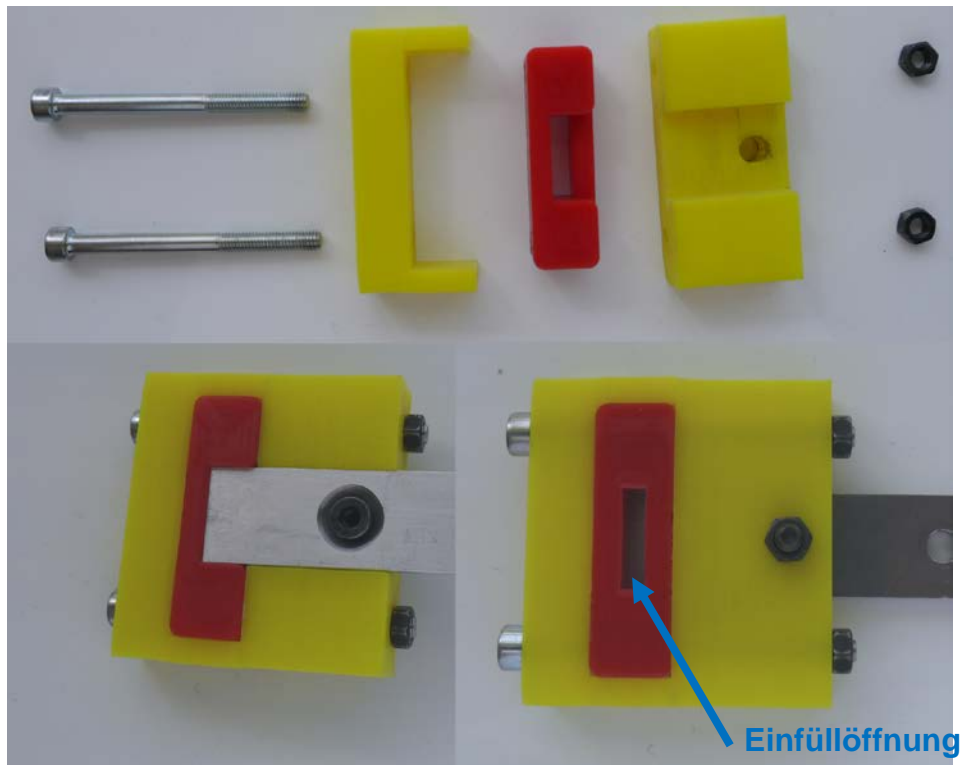


Abbildung 15: Vorrichtung zum Anfrieren der statischen Proben

In dieser Konstellation kann das Wasser anfrieren. Anschließend werden die Schrauben gelöst und das Gerüst sowie das Silikon entfernt. Das Ergebnis ist eine Probe mit der Referenzanfrierung (siehe Abbildung 16).

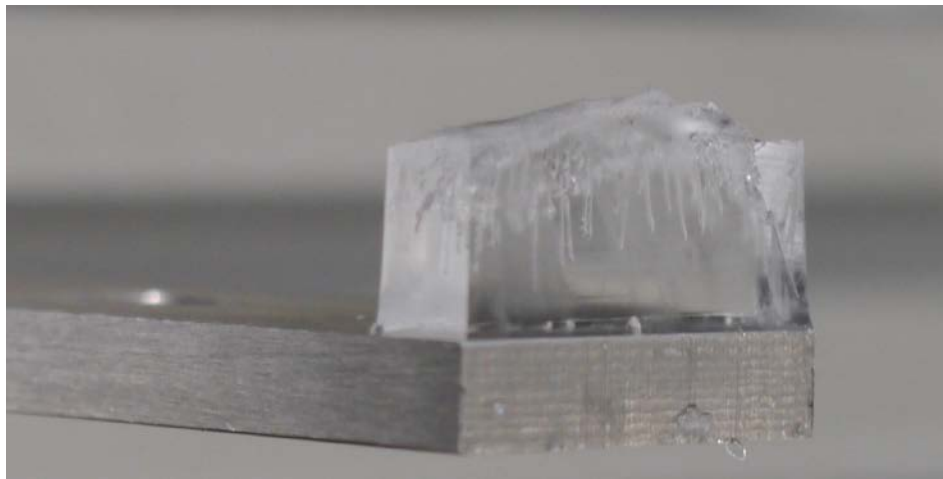


Abbildung 16: Statisch aufgefrorenes Eis auf Probenträger

2.2.4 Vorversuche

Beschleunigungssensoren

Für den Abscherversuch mittels der Zentrifuge wird ein passender Beschleunigungssensor für die Erfassung des Lösens des Eises benötigt. Dieser muss den erwarteten kurzen Ausschlag detektieren können. Es stehen drei vorhandene

Sensoren zur Auswahl. In der folgenden Tabelle sind die verwendeten Sensoren mit den wichtigsten technischen Daten aufgelistet.

Tabelle 1: Technische Daten der Beschleunigungssensoren

	PCB PIEZOTRONICS 352C41	Brüel&Kjær 4507B	IMI Sensors 603-C01
Empfindlichkeit	$1,037 \frac{mV}{m/s^2}$	$9,954 \frac{mV}{m/s^2}$	$10,2 \frac{mV}{m/s^2}$
Messbereich	$\pm 4905 m/s^2$	$\pm 700 m/s^2$	$\pm 490 m/s^2$
Frequenz- bereich	1,0 – 9000 Hz ($\pm 5\%$) 0,5 – 10000 Hz ($\pm 10\%$) 0,3 – 15000 Hz ($\pm 3dB$)	0,3 – 6000 Hz ($\pm 10\%$)	0,5 – 10000 Hz
Resonanz- frequenz	$\geq 30 kHz$	17,8 kHz	25 kHz

Für den Vorversuch werden alle drei Sensoren an der Zentrifuge befestigt. Die Befestigung ist bei allen dreien durch die Gegebenheiten der Sensoren unterschiedlich. Der kleinste ist der Sensor von PCB PIEZOTRONICS. Dieser wird mithilfe einer dünnen Schicht Sensorwachs zwischen Sensor und Außenwand der Zentrifuge befestigt. Der mittelgroße Sensor von Brüel&Kjær wird in einer dazugehörigen Plastikhalterung hineingesteckt. Diese Halterung wiederum wird mittels Kleber an die Zentrifuge fixiert. Der Größte unter den Beschleunigungssensoren ist der von der Firma IMI Sensors. Dieser wird an das Gehäuse geschraubt. Damit der Sensor an der gebogenen Wand fest sitzt, wird eine Adapterplatte angefertigt. Dieser Ausgleich geschieht bei den anderen Verfahren durch das Bindemittel.

Die Vorversuche für die Beschleunigungssensoren werden mit Eis durchgeführt. So kann auch das Ablösen bewertet werden. Das Verhalten des kleinsten Sensors von der Firma PCB PIEZOTRONICS ist am vielversprechendsten. Dieser zeigte am zuverlässigsten das Lösen des Eises an. Die Versuche zeigen, dass die Peaks 100 G überschreiten (siehe Abbildung 17). Dies übersteigt den Messbereich des Sensors von Brüel&Kjær genauso wie den von der Firma IMI Sensors. Zudem zeigt sich eine Tendenz, dass der kleinste Sensor, schneller reagiert. Dieser hat wie in der Tabelle 1 ersichtlich nicht die höchste Sensitivität, kann aber höhere Frequenzen erfassen, als die beiden anderen Sensoren. Der Industriesensor der Firma IMI Sensors wirkt von allen dreien am trägsten. Dies ist wahrscheinlich durch seine größere interne Masse hervorgerufen. Somit wird aus den zur Verfügung stehenden Sensoren der von PCB für die Auswertung und Validierung verwendet.

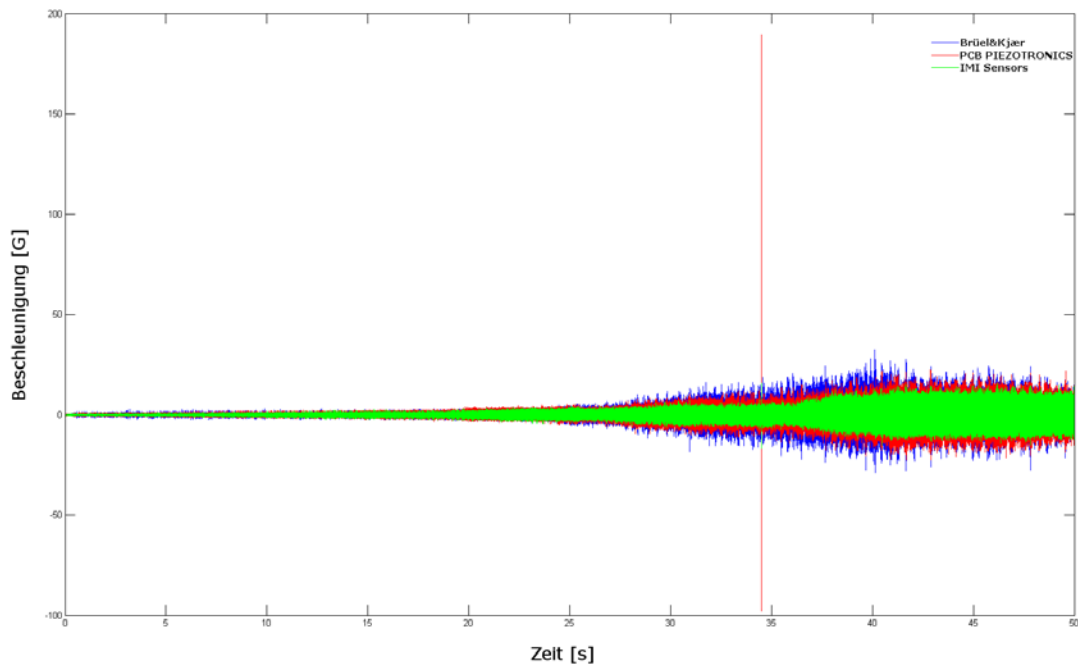


Abbildung 17: Beispiel für Vergleich Beschleunigungssensoren

Für eine Redundanz und besseren Auswertbarkeit werden drei Sensoren verwendet. Diese sind in einem Abstand von 120° angeordnet und werden fest mit dem Gehäuse verklebt.

Vereisung im Windkanal

Für die Vereisung im Windkanal wird eine Vorrichtung benötigt, die die Probe im Windstrom arretiert. Dieses Profil dient dazu, den Probenträger soweit zu vereisen wie gewünscht (5 mm). Neben dem Abdecken des restlichen Probenträgers, soll es dafür sorgen, dass die Strömung nicht zu stark vor und bei der Vereisungsfläche irritiert wird und somit Verwirbelungen vermeiden. Hierfür wurde eine Ummantelung in Form eines NACA-0012 Profils gewählt.

Das **NACA Profil** zählt zu den am meisten untersuchten Profilen in der numerischen Strömungsmechanik. Dies bedeutet, dass man auf ein großes Informationsspektrum zurückgreifen kann, wenn es zu unvorhergesehenen Problemen kommt. Die NACA Bezeichnung beschreibt die Form des Profils. Bei der Variante mit vier Ziffern geben die ersten beiden Ziffern die Profilverwölbung an, in diesem Fall liegt keine vor. Die letzten beiden Ziffern geben das Verhältnis von der Profildicke zu der Profillänge an. Mittels Gleichungen können so die Punkte der Profillinie errechnet werden.

Das verwendete Profil ist 250 mm lang und dadurch an der dicksten Stelle 30 mm . Zur Fertigung des Profils und der Abdeckung, wird ein 3D-Druck Verfahren verwendet. Als Material wird PLA verwendet. Der Einlass für den Probenträger ist, soweit wie die Höhe des Profils es zulässt, nach vorne versetzt (siehe Abbildung 18), damit die Stirnseite des Profils vor der Probe so kurz wie möglich ist. Das Profil ist im Innern Hohl. Nur der Bereich der Nase wurde als massiver Bereich geplant. Die Bereiche des Probenträgers und der späteren Befestigung an den Windkanal sind durch Streben verstärkt. Das

Profil ist zu beiden Stirnseiten offen gehalten und bedarf zur Prüfseite hin einer Abdeckung. Das Verwenden der Abdeckung wurde bewusst gewählt. So kann zu einem späteren Zeitpunkt Veränderungen an der Strömungsführung vorgenommen werden, ohne das gesamte Profil zu ersetzen.

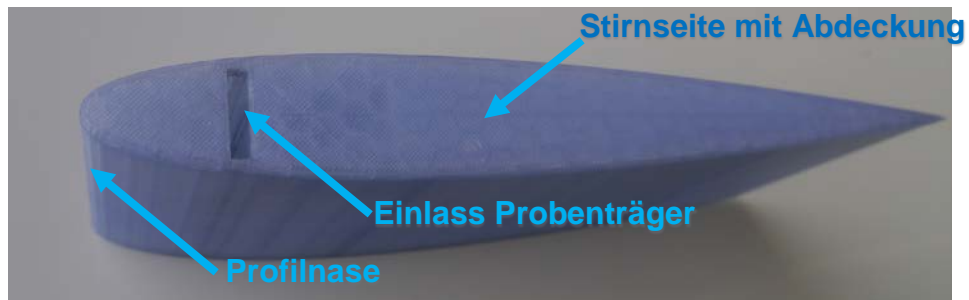


Abbildung 18: Erste Version des Profils

Das Verhalten beim Gefrieren muss untersucht werden, um herauszufinden, wie die Eisbildung sich an der Seite des vorgesehenen Profils verhält. Das erste Vereisen zeigte, dass die Neigung um die Hochachse sehr entscheidend ist. Wie in Abbildung 19 zu sehen, muss die Stirnseite parallel zur Strömung und im Windschatten der Vorderkante liegen.

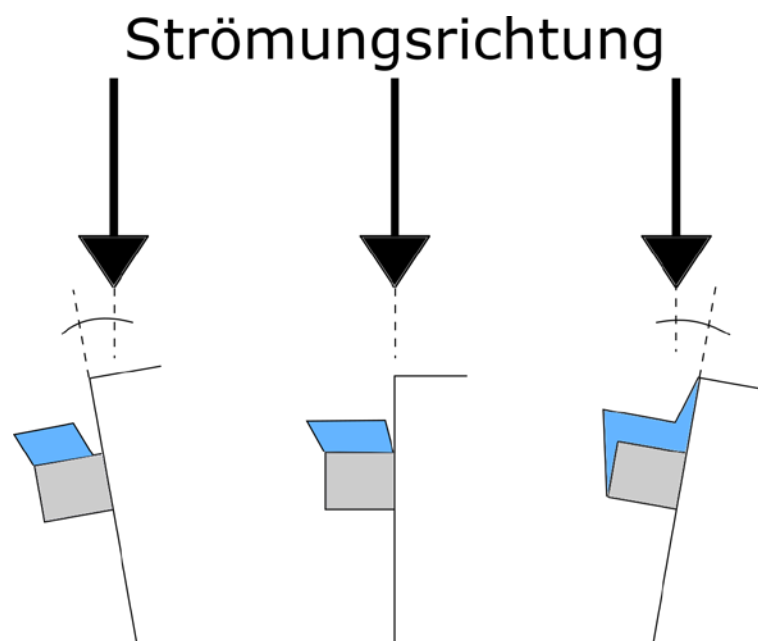


Abbildung 19: Skizze zum Einfluss des Winkels um die Hochachse

Desto mehr es in diese Richtung geneigt ist, desto weniger Eis bildet sich durch die Abschattung durch den vorliegenden Teil des Profils. Zur anderen Richtung geneigt, wächst das Eis auch auf der außenliegenden Kante des Trägers und friert an der Stirnseite des Profils fest. Um ein Festfrieren zu verhindern, ist eine minimale Neigung, mit der Stirnseite im Schatten, von Vorteil. Es bildet sich zudem an der Stirnseite auf Höhe der Profilnase eine Eisablagerung, die senkrecht von der Stirnseite ab wächst (siehe Abbildung 20 [a]). Diese lässt das Eis auf dem Probenträger schräg nach außen

Wachsen (siehe Abbildung 20 [b]). Dies hat den Effekt, dass sich das Eis nicht mit der Stirnseite des Profils verbinden kann. Ein negativer Aspekt ist, dass es in der Mitte des bildenden Eises stärker abgeschirmt wird, sodass es sich da stärker nach außen neigt als an den Rändern. Somit bildet sich ein Kreisbogen.

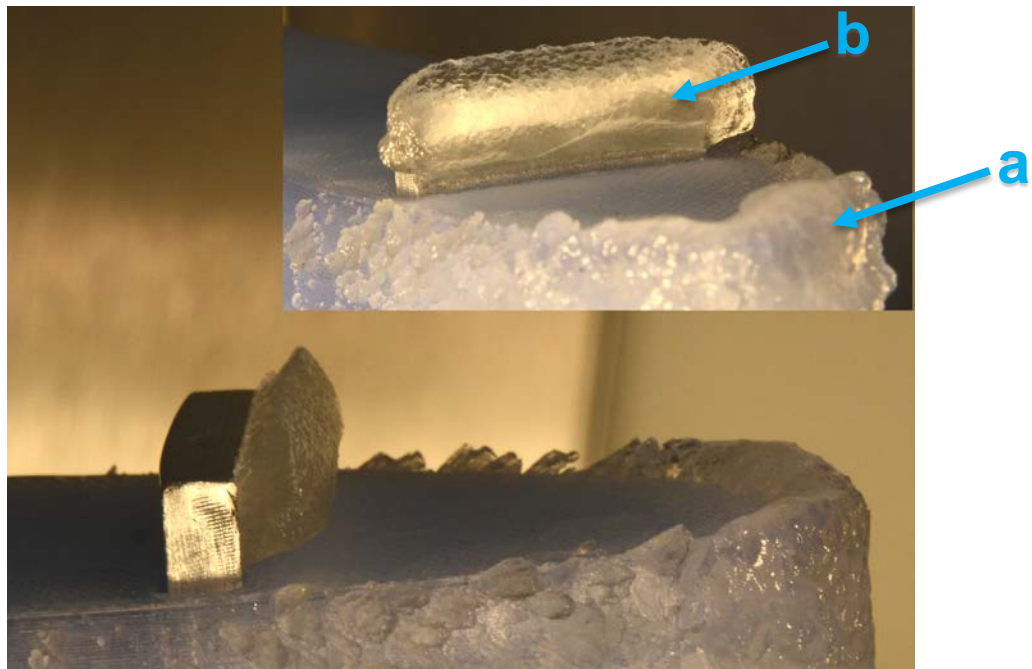


Abbildung 20: Eisablagerung an der Profilnase

Die **Eisbildung** hängt zudem stark von der Umgebungstemperatur ab. Das versprühte Wasser hat eine Temperatur an der Auslassdüse von 10°C . Bei Lufttemperaturen von größer als -10°C beginnt das auftreffende Wasser an der Probe abzufließen und wächst nach hinten über die drei Kanten des Trägers. Das bewirkt, dass zum einen die Probe nicht mehr eingespannt werden kann, zum anderen die Auflagefläche des Eises dann undefiniert ist. Sind die Temperaturen der Umgebungsluft kühler, gefriert das Eis zeitnah beim Auftreffen. So dass das Eis sich, schräg nach oben ausbreitet.

Es wurden Versuche durchgeführt die unter verschiedenen Temperaturen durchgeführt wurden. So zeigte sich schon bei den Vorversuchen die mit höheren Temperaturen durchgeführt wurden (im Bereich von -5°C), dass das Eis nicht sofort beim Auftreffen gefroren ist. Die Wasser tropfen müssen sich, durch die Form des Eises bedingt, nach hinten abgelaufen sein. Das Wasser aus der Düse hat beim austreten noch Temperaturen über dem Gefrierpunkt und muss sich erst beim Weg zum Prüfling unterkühlen. Dies geschieht anscheinend erst bei Temperaturen zwischen -5°C und -10°C . Zudem kann ein kühlerer Probenträger die Wärmeabgabe, des frierenden Wassers, besser abführen.

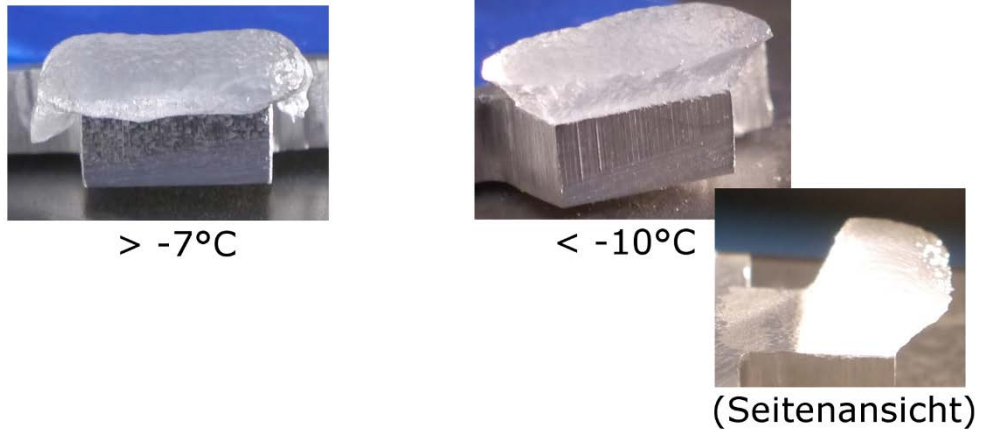


Abbildung 21: Bei unterschiedlichen Temperaturen gebildete Eisformen

Die Menge des aufgesprühten Eises ist mit den gegebenen Mitteln schwer zu kontrollieren. Die Pumpe baut den Wasserdruck im Rohrsystem langsam auf 5 *Bar* auf. Dabei ist die Steigung der Rampe nicht bei jedem Versuch gleich. Zum Ende des Sprühens senkt sich der Druck kontinuierlich. Dieses Verhalten ist in Abbildung 22 dargestellt.

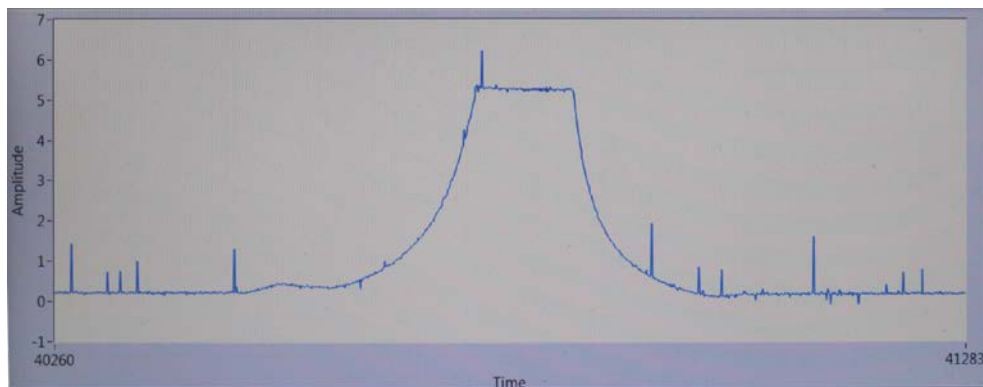


Abbildung 22: Beispiel des Druckverlaufs über die Zeit

Die Abhängigkeit von der Sprühzeit und die Ungenauigkeit zeigten sich deutlich bei den Vorversuchen (siehe Abbildung 23).

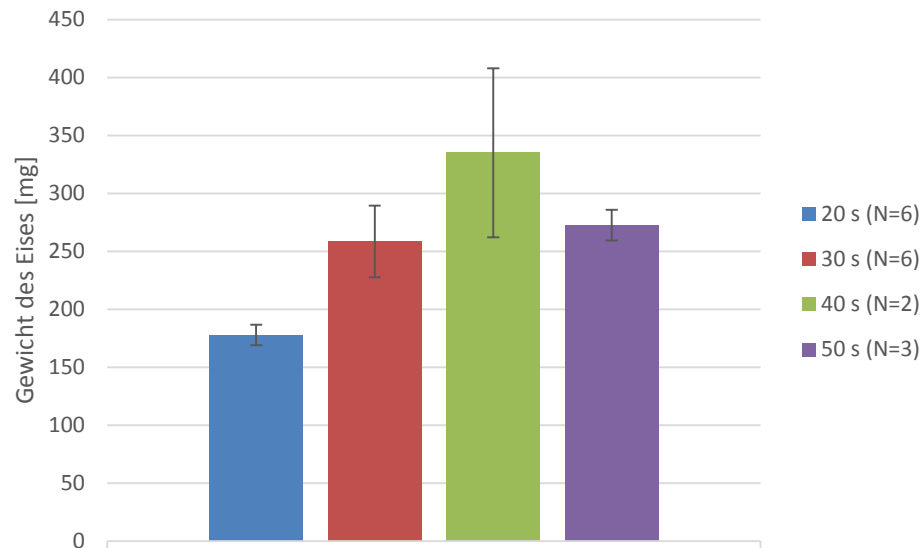


Abbildung 23: Gewicht des aufgesprühten Eises nach Sprühdauer

Bei den Versuchen mit 30 Sekunden und denen mit 50 Sekunden Sprühdauer, zeigt sich eine erhöhte Standardabweichung von 31 *mg* beziehungsweise 73 *mg*. Bei den beiden anderen Versuche liegt diese unter 15 *mg*. Kleine Abweichungen werden durch Störeinflüsse wie unterschiedliche Strömungen oder Druckschwankungen an der Düsenspitze und damit einhergehenden anderen Sprühkegel erwartet. Größere Abweichungen deuten auf einen Fehler in dem Sprühsystem hin.

3 Untersuchung des Zentrifugenprüfstands

In diesem Kapitel geht es um die eigentliche Durchführung der Validierung. Sie geschieht in drei Schritten, die hier nacheinander abgehandelt werden.

3.1 Zugversuch statischer Proben

Der Zugversuch der statischen Proben soll einen Einblick in die Verhältnisse der benötigten Kraft geben.

3.1.1 Versuchsablauf und Datenerhebung

Es handelt sich hierbei um einen einfachen Zugversuch. Dabei wird ein Probenträger mittels der extra für das statische Anfrieren entwickelten Konstruktion mit einem Eiswürfel präpariert. Hierfür wird die Silikonform mit zwei Schrauben im Kunststoffgerüst fixiert und anschließend der Probenträger in die dafür vorgesehene Vertiefung eingeschraubt. Durch die leichte Pressung des Probenträgers an das Silikon, werden die Stoßkanten abgedichtet. Die so vorbereitete Form mit dem Träger wird mit deionisiertem Wasser gefüllt und gefroren. Die Menge des Eises ist für den Versuch nicht von Bedeutung. Ein höherer Eiswürfel bietet für den Versuch eine größere Angriffsfläche für das Abscheren. Die Vorrichtung für den Zugversuch ist ein vorhandener Versuchsstand, der für diesen Zweck angepasst wird (siehe Abbildung 24).

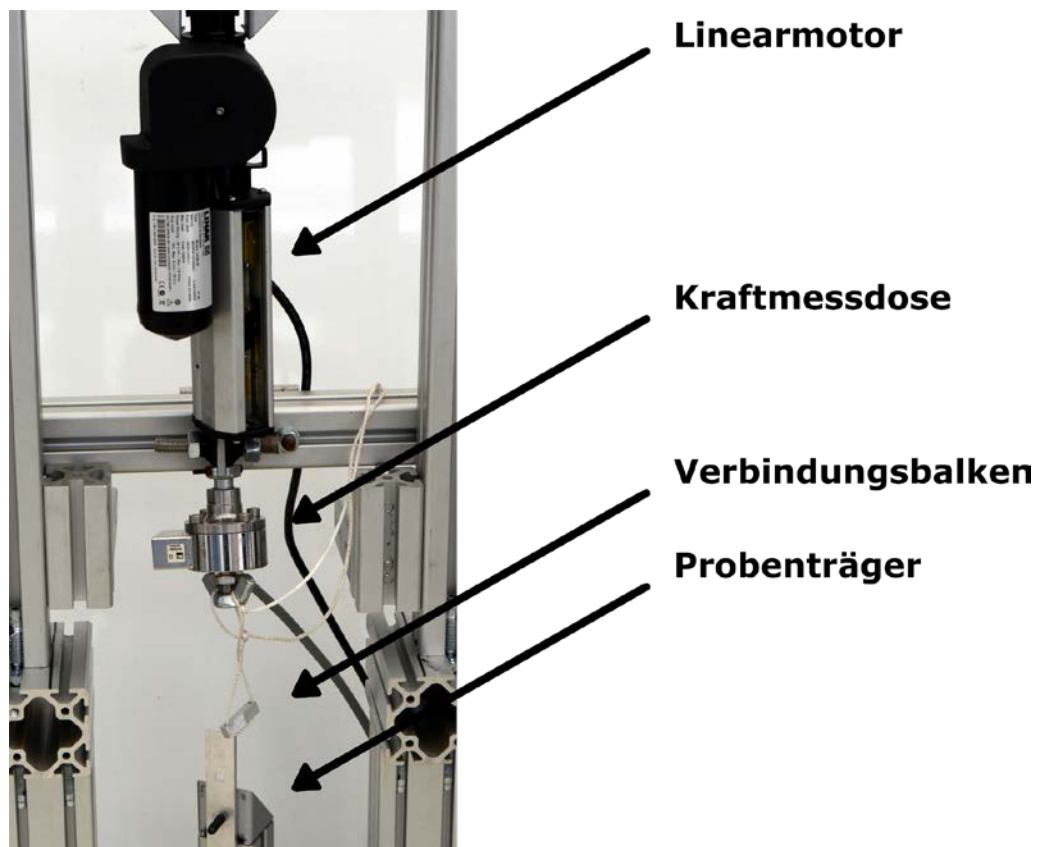


Abbildung 24: Statischer Zugversuch mit Linearmotor

Der Träger mit dem Eis wird senkrecht festgespannt. Über diesem hängt an einem Linearmotor (LA28 der Firma LINAK) eine 500 N Kraftmessdose (U2B der Firma HBM). Diese wird mittels einer Schnur und einem geraden Verbindungsstück an das Eis verbunden. Die Kraftmessdose ist an einem Messverstärker (MGCplus mit Modul: ML55S6 der Firma HBM) angebunden und dieses Signal wird mittels des VibPilot aufgezeichnet. Während des Versuches zieht der Elektromotor mit konstanter Geschwindigkeit die Schnur straff, die die Kraft auf das Eis aufbringt. Als Messgrößen werden die Kraft und die Zeit aufgenommen. Somit ergibt sich kein standardisiertes Kraft-Weg-Diagramm. Die ausschlaggebende Messgröße ist die aufgebrachte Kraft zum Zeitpunkt des Lösens. Und diese ist die Maximal gemessene Kraft.

3.1.2 Aufbereitung und Auswertung

Der Versuch ergab nicht die erhofften Resultate. Das Eis löste sich nicht komplett von der Oberfläche. Es blieben Reste auf der Oberfläche, sodass die gemessene Kraft nicht ausschließlich auf die Adhäsion zwischen Eis und Träger zurückzuführen ist. Ein Teil der Kraft wird durch das brechende Eis aufgenommen. Zudem löste sich das Eis teilweise mit mehreren Peaks. Diese Daten werden in der Auswertung nicht betrachtet. Eine Verbesserung des Teststandes wurde aus Gründen der Effektivität und Effizienz der Untersuchung unterlassen.

Die bei jedem Versuch erfassten Werte ergeben ein Kraft-Zeit-Diagramm (siehe Abbildung 25). Der in dieser Abbildung dargestellte Fall trat nicht immer ein. Bei einigen Versuchen sind Teilstücke des Eises abgebrochen und die Zugmaschine hat sich erneut an dem stehengebliebenen Eis festgeklemmt, sodass mehrere Peaks zu sehen sind.

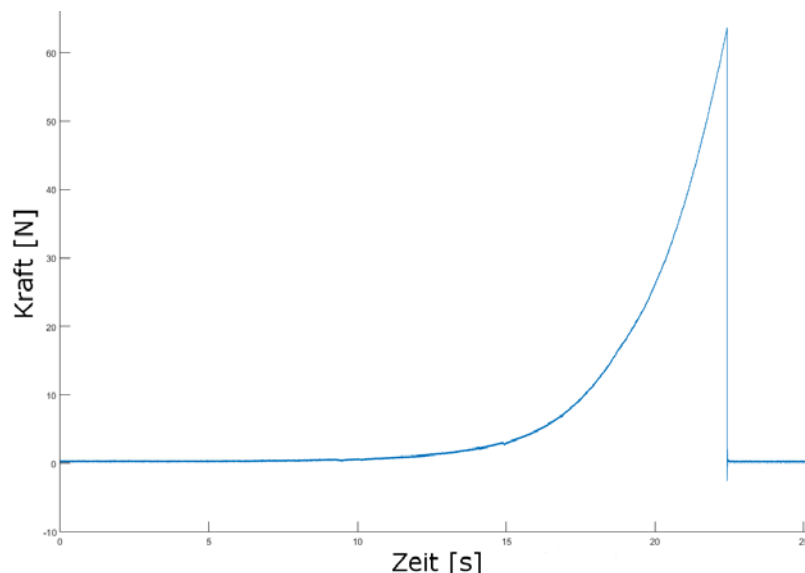


Abbildung 25: Beispiel einer Messung (Kraft-Zeit-Diagramm)

Für die Auswertung werden nur die Datensätze mit einem Peak herangezogen. Dies geschieht, weil nachträglich nicht mehr bestimmen kann, wie viel Verbindungsfläche bei jedem Peak abgelöst ist. Wenn man die Rohdaten auswertet, erhält man eine Messreihe mit $N = 4$. Der Durchschnitt der Messwerte beträgt 47,62 N mit einer

Standardabweichung von $10,25\text{ N}$ ($\sim 21,52\%$). Dieses Ergebnis ist nicht aussagekräftig genug, da bei jeder Messung Eis auf dem Probenträger blieb. Bei drei Versuchen wurde im Anschluss der Probenträger mit dem übrigen Eis fotografiert für eine nachträgliche Bestimmung der gelösten Fläche. Man erhält somit eine gemittelte Spannung von $0,777\text{ MPa}$ und eine Standardabweichung von $0,146\text{ MPa}$ ($\sim 18,79\%$).

Die hohe Standardabweichung der Ergebnisse zeigt die gleichen Tendenzen für eine Aluminiumoberfläche, wie das Ergebnis der Bachelorarbeit „Evaluierung unterschiedlicher Enteisungssysteme zum Einsatz an einer flexiblen Flügelvorderkante“ [8]. Dies zeigt, das Eis von seiner Beschaffenheit sehr spröde ist und kleine Fehler sich im Eis schnell ausbreiten.

3.2 Vergleichsmessung des Zentrifugenprüfstands

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit der Wiederholbarkeit des Prüfstands, mittels reproduzierbarer Proben.

3.2.1 Versuchsablauf und Datenerhebung

Die Herstellung der Proben geschieht auf die gleiche Weise wie beim Zugversuch. Der einzige Unterschied ist die Menge des zu frierenden deionisierten Wassers. Es werden $0,3\text{ ml}$ auf die Oberfläche aufgefroren. Für das genaue Gewicht wird diese nochmals gewogen mit einer Waage der Firma Kern des Typs PFB 300-3. Anschließend wird sie in die Zentrifuge eingespannt. Das weitere Vorgehen wird wie bei der folgenden endgültigen Validierung gehandhabt. Nachdem der Probenträger mit dem statisch angefrorenen Eis an den Rotor der Zentrifuge angebracht ist, werden die Zentrifuge und die Aufzeichnung der Sensoren für Beschleunigung und Drehzahl gestartet. Der Rotor dreht seine vorprogrammierte Rampe bis zu den angestrebten 6000 1/min . Durch Probleme mit dem Regler schaltet sich die Zentrifuge in der Regel früher aus. Dies geschieht, weil die Leistung des Motors übertreten wird und der Regler ab einem gewissen Punkt abschaltet. Dies geschieht in den meisten Fällen, nachdem das Eis gelöst ist. Die Auswertung der Datensätze geschieht im Anschluss der Versuche.

3.2.2 Aufbereitung und Auswertung

Es wurden fünf Messungen durchgeführt. Die erste Messung wird aus der Reihe herausgenommen, weil die Höhe des Eises zum Einsetzen zu groß war. Somit klemmte das Eis zwischen Träger und Rotor. Dies wurde erst nach dem Einsetzen festgestellt, sodass nicht gewährleistet werden kann, dass die Probe nicht vorbelastet ist.

Die verbleibenden vier Proben wurden unter ähnlichen Bedingungen hergestellt und geprüft. Die Temperaturen weichen voneinander mit maximal einem Grad Celsius ab. Durch die geringe Anzahl an Proben, wird der zweite Versuch bei dem eine um 13% geringere Fläche vorherrscht, mit einbezogen.

Wenn man die vier Messwerte gleichberechtigt untersucht ergibt sich ein Mittelwert der Kraft von $17,58\text{ N}$ mit einer Standardabweichung von $1,05\text{ N}$ ($5,97\%$). Wird der Wert der aufgebrachten Kraft auf die ganze Fläche erweitert erhöht sich die benötigte

Kraft für die Probe. Der sich ergebene Mittelwert beträgt nun $18,19\text{ N}$ mit einer Standardabweichung von $1,45\text{ N}$ (7,97 %).

Im Vergleich zu dem Zugversuch zeigt das Abscheren mit der Zentrifuge eine geringere Standardabweichung. Die benötigte Kraft zum Abscheren wird gleichzeitig auch geringer. Dies könnte ein Anzeichen für eine homogenere Krafteinwirkung sein.

Während der Versuchsdurchgänge zeigte sich regelmäßig ein Abbruch durch den Regler. Dieser zeigte ein Überlastfehler. Durch eine weitere Untersuchung des Fehlers zeigte sich das vor dem Abbruch der Motor einen Strom von über zehn Ampere benötigt. Dies entspricht der doppelten ausgelegten Leistung des Motors. Die Drehzahl an diesem Punkt lag zu diesem Zeitpunkt über 5400 1/min . Die Rotorspitze bewegt sich zu diesem Zeitpunkt mit $141,37\text{ m/s}$ (508 km/h). Zu diesem Zeitpunkt kann der Luftwiderstand des Profils und der drehenden Peripherie die Leistung des Motors (3 kW) übersteigen. Die Leistung steigt mit der dritten Potenz der Geschwindigkeit.

3.3 Validierung des Zentrifugenprüfstands

In diesem Abschnitt wird der Zentrifugenprüfstand abschließend für die Validierung untersucht. Die Ergebnisse werden dabei in der Auswertung mit den vorherigen ermittelten Ergebnissen verglichen.

3.3.1 Versuchsablauf und Datenerhebung

Bei der endgültigen Validierung des Zentrifugenprüfstands steht der gesamte angedachte Verlauf im Fokus. Hierfür werden die Probenträger mit Ethanol gereinigt. Dies geschieht, um die Oberfläche frei von Fetten und anderen Fremdstoffen zu bekommen. Das Profil zum Fixieren des Probenträgers wird in die Prüfkammer des Windkanals eingebaut und auf den Sprühstrahl ausgerichtet. Diese Einstellung wird aufgezeichnet, um für spätere Versuche ein reproduzierbares Ergebnis zu erhalten. Nachdem der Träger in das Profil eingebaut ist, wird das System auf Zieltemperatur gekühlt und anschließend die Besprühung aktiviert. Der Druckaufbau ist nicht reproduzierbar und variiert von Versuch zu Versuch in einem kleinen Bereich. Die Sprühzeit wird ab dem Zeitpunkt gemessen, an dem 5 Bar anliegen. Dennoch wird sich in dem Zeitverlauf, an dem der Druck sich aufbaut, eine Eisbildung einstellen. Nachdem die vorgegebene Sprühzeit vorüber ist, wird die Pumpe deaktiviert und der Druck senkt sich. Auch hier wird die Zeit nicht beachtet, obwohl hier weiter Eisbildung stattfindet. Nachdem der Druck abgebaut ist wird der Windkanal weitere 30 Sekunden bei Testbedingungen laufen gelassen. Dies geschieht um das zu prüfende System, welches sich durch die Eisbildung leicht erwärmt hat, wieder herab zu kühlen. Anschließend wird die Probe aus dem Profil entnommen, besichtigt und gewogen. Das Profil, in dem der Träger vereist wird, wird nach jedem Prüfdurchgang vom Eis befreit, sodass jedes Mal die gleiche Ausgangsbedingung vorherrscht. Für das Einbauen darf das Eis nicht zu weit in die Breite wachsen. Geschieht dies und wird nicht vor dem Einbau weit genug entfernt, bricht das Eis beim Einbau weg. Das Entfernen geschieht kraftlos, mit einem warmen Metallstücks. Das Entfernen der ‚Flügel‘ geschieht vor dem Wiegen.

Die nächsten Schritte entsprechen denen der Vergleichsmessung von Kapitel 3.2.1. Der Träger mit dem Eis wird vorsichtig in die Zentrifuge eingelegt und verschraubt. Die Zentrifuge und Aufzeichnung der Signale der Sensoren für Beschleunigung und Drehzahl werden gestartet. Die Zentrifuge fährt ihre Rampe bis zu den angepeilten 6000 1/min . Dies geschieht in einer bestimmten Zeit von 50 Sekunden. Die Aufzeichnung der Sensoren wurde auf die gleiche Zeit begrenzt, sodass sie sich von selbst abschaltet. Die erfassten Daten werden abgespeichert und mittels der Software MATLAB der Firma Mathworks ausgewertet.

3.3.2 Aufbereitung und Auswertung

Die ersten Versuche mit aufgesprühtem Eis zeigten in den meisten Fällen das gleiche Verhalten beim Lösen vom Träger. Das Eis teilt sich in zwei Fragmente. Dadurch wird eine sinnvolle Auswertung unmöglich. Es kann nicht bestimmt werden, wie viel Masse bei den einzelnen Peaks abgeschert ist. Zur Verbesserung dieser Situation wurde ein Probenträger an der Vereisungsstelle auf 10 mm verjüngt (siehe Abbildung 26).

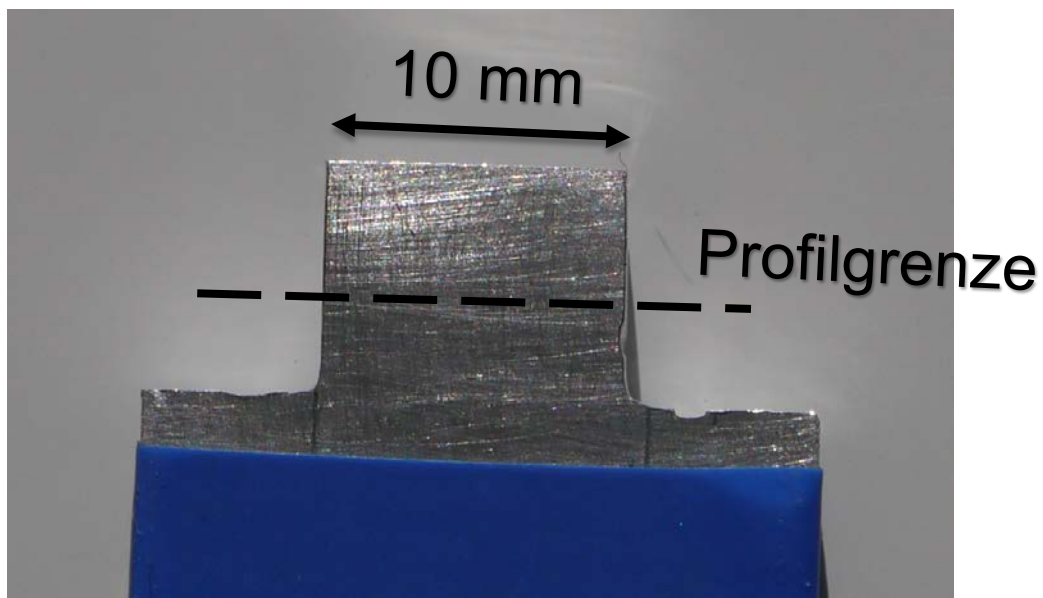


Abbildung 26: Veränderter Probenträger mit verjüngter Vereisungsfläche

Durch die Reduzierung der Auflagefläche ist die Krafteinleitung gleichmäßiger über die Breite verteilt. Zudem ist die Wahrscheinlichkeit geringer, dass eine Fehlstelle im Eis auf der Länge dieses teilt. Ein weiterer Vorteil ist, dass das Eis seitlich wachsen kann, ohne dass es zu Problemen beim Einbauen kommt.

In der folgenden Auswertung werden die fehlerhaften Datensätze nicht beachtet. Darunter fallen jene mit mehreren Peaks und die Messungen, bei denen die Zentrifuge vorm Lösen abgeschaltet hat und die Probe durch einen zweiten Anlauf nicht mehr vergleichbar war. Zudem wurde eine Probe (10.04.2015, 12:45) entfernt. Diese wich stark von den anderen Messungen ab und wird als Ausreißer behandelt. Die gemessene Kraft bei dieser Probe war sehr klein. Die übrigen Werte werden in fünf Temperaturbereiche unterteilt und mit Angabe der Standardabweichung verglichen (siehe Abbildung 27). Es wird versucht die Unterteilung logisch an die gemessenen

Werte anzupassen. Dies ist bedingt durch die gegebene grobe Kontrollierbarkeit der Temperatur in der Kühlkammer.

Die Ergebnisse zeigen, dass die benötigte Kraft zum Lösen des Eises von der Umgebungstemperatur abhängt. Es ergeben sich bei den höheren Temperaturen deutlich voneinander abgegrenzte Stufen zwischen den Temperaturbereichen. Zudem ist die Standardabweichung für die breiten Temperaturbereiche in einer annehmbaren Höhe. Dies deutet auf eine direkte Abhängigkeit zu der Temperatur am Zeitpunkt des LöSENS hin.

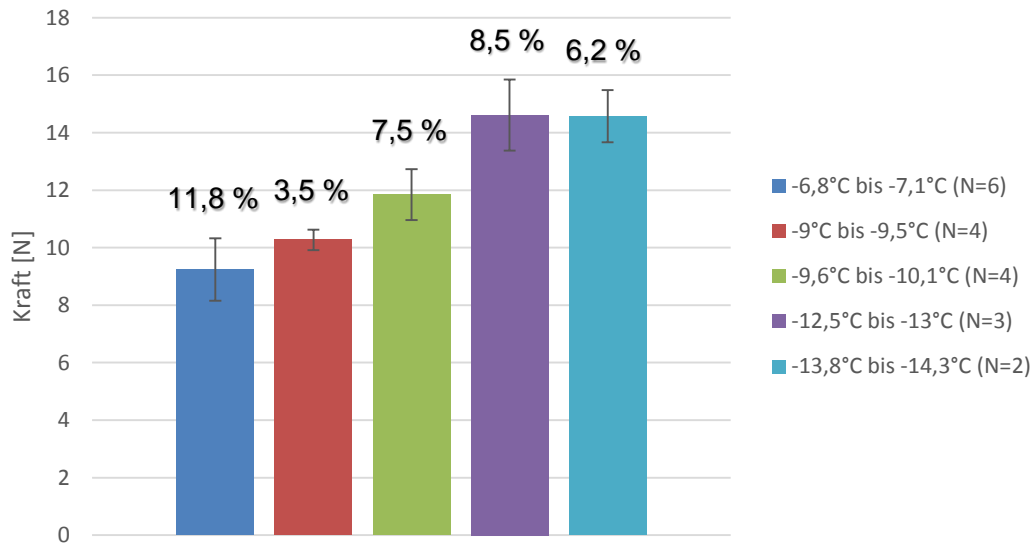


Abbildung 27: Abhängigkeit der Kraft zum Ablösen mit der Temperatur (inkl. Standardabweichung in Prozent)

Eine Ausnahme besteht lediglich zwischen dem Temperaturbereich $-12,5^{\circ}\text{C}$ bis -13°C und dem von $-13,8^{\circ}\text{C}$ bis $-14,3^{\circ}\text{C}$. Hier gibt es keinen signifikanten Unterschied. Es kann keine Aussage darüber getroffen werden ob es sich hier um ein existierendes Phänomen handelt, oder es sich auf Messfehler, beziehungsweise fehlende Daten zurückführen lässt. Tieferen Temperaturen können zu diesem Zeitpunkt nicht untersucht werden. Die Zentrifuge schaltet sich durch Überlast aus, sodass keine höheren Drehzahlen erreicht werden, die für Temperaturen von -14°C und darunter benötigt werden.

Die Masse unterscheidet sich leicht bei jedem Versuch. Dies ist bedingt durch den manuellen Sprühvorgang. Dies hat sich im Laufe der Untersuchung durch Erfahrungswerte stets verbessert. Die gewerteten Versuche hatten eine Abweichung voneinander im unteren zweistelligen Milligramm Bereich. Um den Einfluss auf die benötigte Scherkraft zu deuten, werden in Abbildung 28 die Standardabweichungen von Kraft und Eismasse gegenübergestellt. Es gibt keine Anzeichen, dass die Massenunterschiede in den einzelnen Versuchsgruppen Einfluss auf deren Standardabweichung der Kraft ausüben.

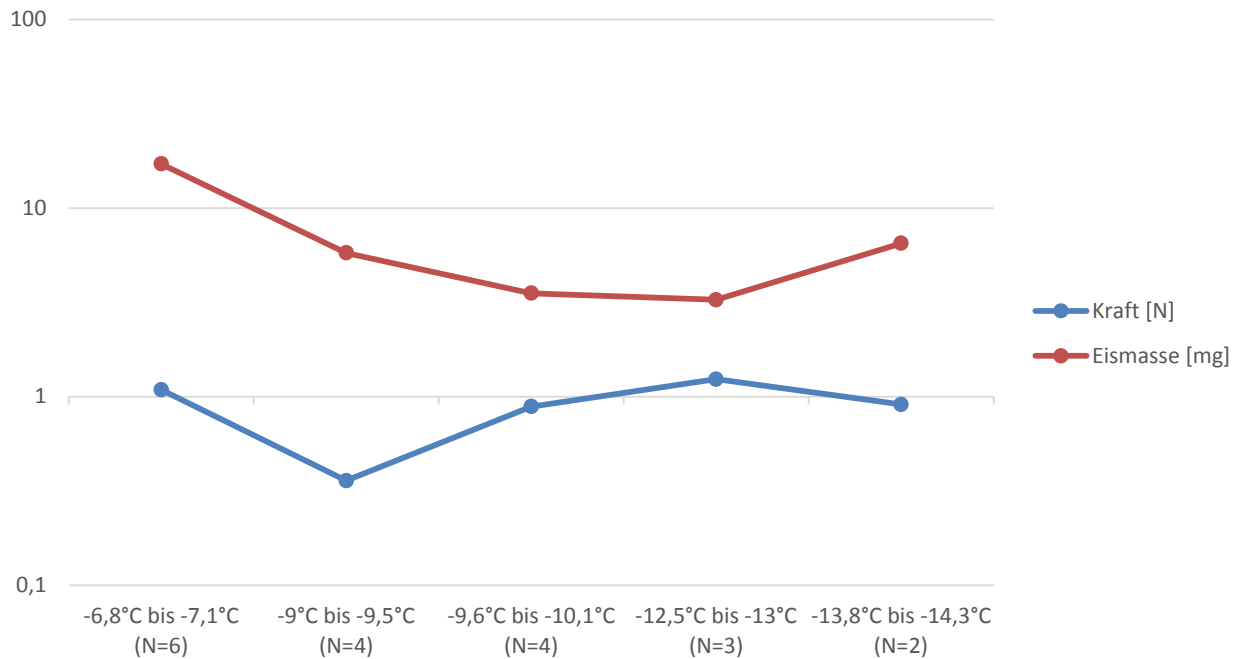


Abbildung 28: Vergleich der Standardabweichungen von Kraft und Eismasse

Ein wichtiger Faktor für die Überlast des Motors ist der Luftwiderstand, der am Rotor anliegt. Während der Versuche zeigte sich eine zunehmende Rauheit des letzten Drittels des Rotors. Diese nahm mit der Zeit zu, mit vereinzelt erkennbaren Kratern. Dies hat zur Folge, dass der Widerstand mit der Zeit zunehmen wird. Die einzig erkennbare Ursache für dieses Phänomen liegt in dem, was mit dem Eis nach dem Ablösen passiert. Eine Vermutung legt nahe, dass das Eis beim Aufprallen an der Außenwand in eine Wolke pulverisiert wird, und diese durch den Rückstoß und die Luftbewegung im Innern wieder in die Rotorbahn geschleudert wird. Bei der hohen Drehzahl zu diesem Zeitpunkt durchläuft der Rotor einige Male diese Fragmentwolke. Diese These wird durch den Faktor bestärkt, dass nach den Versuchen kein Eis in der Zentrifuge zu finden ist, obwohl diese nach unten abgedichtet ist. Zudem zeigen die Aufzeichnungen, dass die Beschleunigung, die beim Auftreffen auf der Außenwand auf das Eis wirkt, teils mehr als 1500 m/s^2 beträgt.

Neben der hohen Leistung, die benötigt wird um den Rotor zu beschleunigen, hat der Luftwiderstand noch eine andere negative Eigenschaft für den Versuch. Während zwölf der Versuche wurde die Lufttemperatur innerhalb der Zentrifuge nahe des Rotors notiert, einmal vor dem Versuch und einmal am Ende. Innerhalb der Versuchszeit hat sich die Luft zwischen $3,9^\circ\text{C}$ und $5,2^\circ\text{C}$ erwärmt. Die direkte Oberfläche des Rotors wird sich mindestens um die gleiche Temperatur erhöhen. Es kann zu diesem Zeitpunkt nicht bestimmt werden, ob sich der Temperaturgradient bis zur angefrorenen Stelle ausgeweitet hat und in welchem Umfang die Temperatur verändert wurde.

Ein interessanter Vergleich ist der mit dem statisch aufgebrauchten Eises (siehe Abbildung 29). Hierfür müssen die Ergebnisse zuerst aufeinander angepasst werden. Die statisch gefrorenen Proben hatten eine doppelt so große Auflagefläche durch die zum Schluss veränderte Probengeometrie. Es wird vereinfacht angenommen, dass die

Kraft proportional zur Fläche ist. Es ist kein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Messreihen zu erkennen. Das sprühend aufgetragene Eis löst sich etwas später. Die Standardabweichung ist etwas größer als bei dem statisch aufgefrorenen Eis.

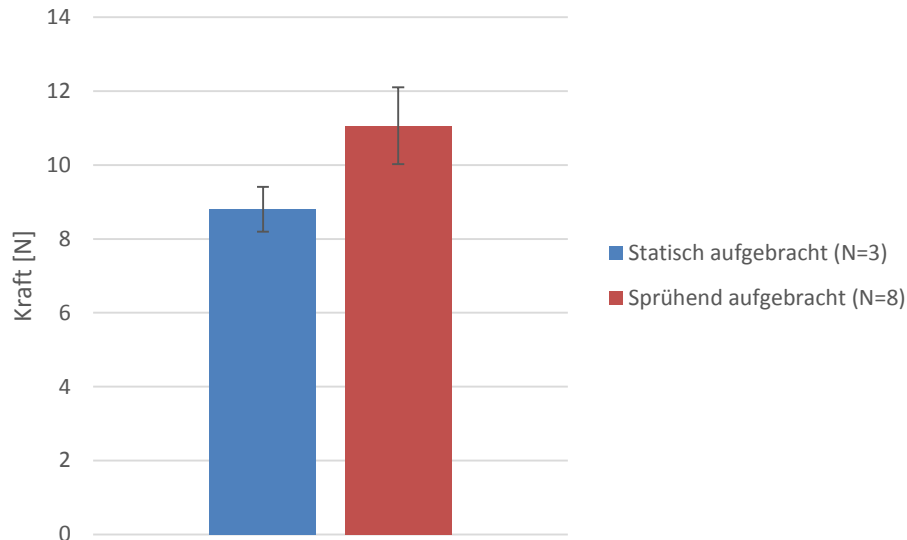


Abbildung 29: Vergleich statisch und sprühend aufgetragenes Eis (Annahme Kraft zur Fläche proportional)

Dass das aufgesprühte Eis etwas fester an der Oberfläche haftet, könnte an der fehlenden Oberflächenspannung beim Gefrieren liegen. Es friert beim Aufprallen auf der Oberfläche fest und könnte somit tiefer in die Struktur eindringen. Wohingegen das statisch gefrorene Eis nur eine leichte Bindung mit der Oberfläche eingeht (siehe Abbildung 30).

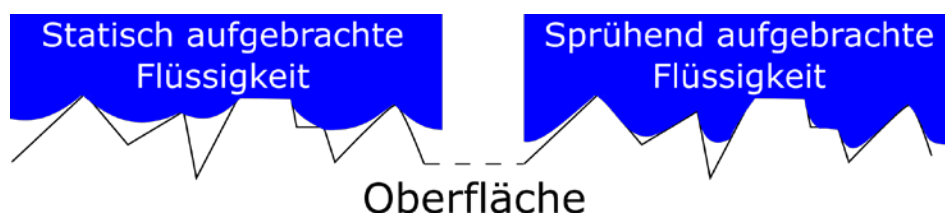


Abbildung 30: Unterschiedliches Eindringen in die Oberflächenstruktur

Die Annahme der proportionalen Abhängigkeit von Kraft und Fläche wird im Folgenden diskutiert. Laut der Gleichung 2 hat lediglich die Masse des aufgefrorenen Eises Einfluss auf die Kraft. Um zu prüfen, welchen Einfluss dies auf die Kraft hat, werden sprühend vereiste Proben herangenommen. Von diesen liegen Ergebnisse jeweils mit 20 mm und 10 mm Vereisungsbreite vor. Bei den 20 mm Proben existieren nur Sprühzeiten von 20 und 30 Sekunden. Für eine erste Beurteilung wurde für die Proben mit größerer Vereisungsfläche jeweils die gleiche Anzahl an Versuchen für die höhere und niedrige Sprühdauer herangenommen. Somit werden die Ergebnisse zu den 25

Sekunden der Versuche mit 10 mm Breite vergleichbar. Zudem ist die Abweichung innerhalb der Zeiten bei den alten Versuchen größer. Diese Abweichungen erschweren eine Aussage. Dieses Verfahren ergibt zwischen den Vereisungsflächen ein Verhältnis der Kraft von 1,55. Ein mögliche Erklärung ist die Auffriergeometrie. Diese ist leicht schräg nach außen gerichtet und wächst somit über die Probenfläche hinaus.

Rechnet man in Abbildung 29 anstatt mit dem angenommenem Faktor von zwei mit dem neuen errechneten, erhält man:

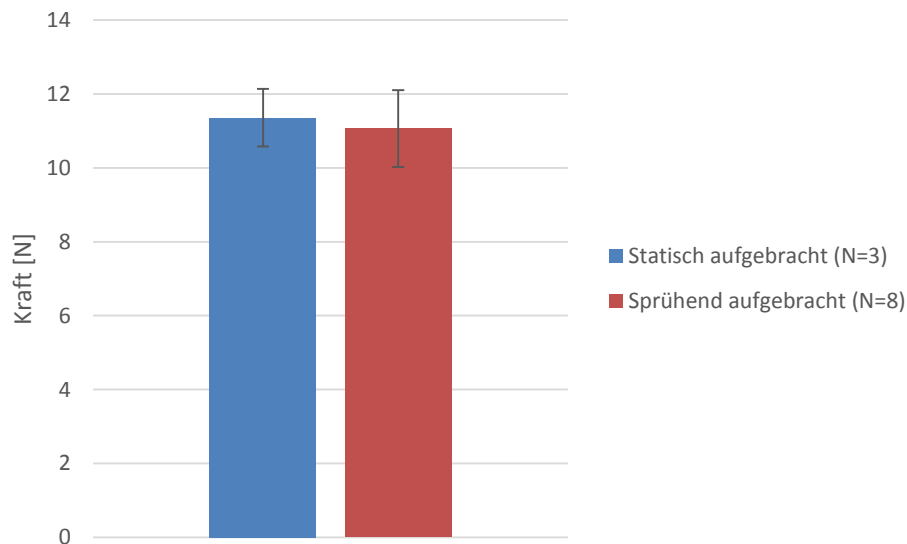


Abbildung 31: Vergleich statisch und sprühend aufgetragenes Eis
(Korrekturfaktor Kraft-Fläche: 1,55)

Mittels des neu errechneten Korrekturfaktors besteht kein signifikanter Unterschied zwischen den unterschiedlichen Aufbringungsarten. Dieses Ergebnis ist vielversprechend, aber sollte noch einmal überprüft werden.

Bei zwei Messungen konnte beobachtet werden, dass der Mess-Peak erst kurz nachdem Herunterfahren der Drehzahl auftauchte. Dies bedeutet, dass das Lösen in diesen beiden Fällen bei einer niedrigeren Geschwindigkeit als die Maximal aufgetragene stattfand. Eine Erklärung lässt sich durch die Theorie finden, die besagt, dass zwischen Oberfläche und Eis eine flüssige Grenzschicht herrscht. Somit könnte das Eis von der Oberfläche rutschen. Dies hält eine kurze Zeit an, sodass das Eis bei einer höheren Geschwindigkeit angefangen hat sich zu bewegen, wobei im gleichen Moment die Drehzahl wieder abnimmt, aber das Eis durch die kleinere Auflagefläche sich weiter bewegt bis zum Lösen. Um diese These zu beweisen, muss eine Möglichkeit gefunden werden das Rutschen zu detektieren.

4 Zusammenfassung

Im letzten Kapitel werden die Ergebnisse noch einmal zusammengefasst und die Nutzbarkeit der Zentrifuge zur Adhäsionsprüfung bewertet. Anschließend werden im zweiten Abschnitt Anregungen zur weiteren Untersuchung der ungewissen Parameter gegeben.

4.1 Fazit

Ziel der vorliegenden Studie war, eine Evaluierung einer Zentrifuge zur Messung der Eisadhäsionsfestigkeit an Oberflächen zu tätigen. Bevor die Versuche losgehen konnten, musste die Zentrifuge zuerst für die Aufgabe ausgebaut werden. Neben dieser Tätigkeit wurde für eine bessere Aussage eine standardisierte Eisaufringung für die Art der Probenträger entwickelt. Mit dieser Vorrichtung wurden zwei Vorversuche durchgeführt.

Der erste war ein vereinfachter Zugversuch. Dieser zeigt auf, dass es erhebliche Schwierigkeiten beim Lösen des Eises gibt. Das Eis ist zerbrochen und es bleiben Rückstände auf dem Probenträger zurück. Dies verdeutlicht, dass eine nicht optimale Kraftaufbringung und die entstehenden Spannungen im Material das Eis durch die sehr spröden Eigenschaften zum Bersten bringt. Bei Oberflächen mit einer geringen Adhäsion zum Eis kann die Kraft fürs Lösen geringer sein als die zum Brechen des Eises.

Der zweite Versuch behandelte die standardisierten Proben in Verbindung mit der Zentrifuge. Das Eis löste sich in diesen Versuchen bei einer geringeren Kraft. Es zeigte sich bei den meisten Versuchsdurchgängen in der Auswertung der Daten, dass sich das Eis in zwei Ausschläge gelöst hat. Dies gab Grund zur Annahme, dass das Eis sich in zwei Teilstücken löst. Die Oberfläche war nach den Versuchen stets eisfrei. Dies deutet auf eine bessere Kraftaufbringung in der Hochachse bis hin zur Oberfläche. An welcher Stelle sich das Eis geteilt hat, konnte nicht bestimmt werden. Es könnte sich in der Breite geteilt haben oder Schichtweise in der Höhe. Um dies festzustellen, müsste der Versuch zwischen zwei Messspitzen abgebrochen werden. Dies konnte jedoch nicht bewerkstelligt werden. Eine nachträglich optische Begutachtung des abgescherten Eises konnte nicht durchgeführt werden, da es keine Rückstände gab.

Der doppelte Ausschlag in den Sensordaten konnte auch mit den aufgespritzten Proben im Vorversuch reproduziert werden. Dies gab den Anstoß, den Probenträger von der Auflagefläche zu verkleinern. Laut Messdaten trat so die erhoffte Verbesserung ein und das Eis löste sich ganzheitlich ab.

Das Aufspritzen des Eises mittels des Profils funktioniert und verbindet sich nicht mit diesem. Dennoch gibt es ein Problem, welches beim Verlauf des Sprühvorgangs entsteht. An der Profalnase bildet sich eine Eisablagerung, die mit der Zeit über die zufrierende Fläche wächst. Dabei schattet es diese mit der Zeit zunehmend ab.

Die Ergebnisse der Versuche mit dem sprühend aufgetragenen Eis zeigen, dass die Kraft zum Lösen mit sinkender Temperatur ansteigt. Bei tiefen Temperaturen (ab

-14°C) ergibt sich, dass die Zentrifuge durch die begrenzte Drehzahl das Eis nicht mehr zuverlässig abschert.

Die Wiederholbarkeit stellt ein maßgebliches Bewertungskriterium da. Anhand der bisherigen Daten ist ersichtlich, dass die Standardabweichung einen guten Wert aufweist, wenn man Datensätze mit gleichen Randbedingungen vergleicht. Dies sieht man in den Abstufungen der Temperaturbereiche. Die Wiederholbarkeit ist so weit gegeben, um dies darzustellen.

Als abschließende Beurteilung kann der Zentrifugenprüfstand zur Bestimmung der Adhäsionsbestimmung von Oberflächenvereisung zu diesem Zeitpunkt nicht verwendet werden. Dies liegt hauptsächlich an der maximal zu erreichenden Drehzahl, die durch die zu geringe Leistung des Motors begrenzt wird. Zudem weist das Profil zur Vereisung ein Defizit an der Vorderkante auf, sodass an der Stelle das Eis über die zu besprühende Fläche wächst und einen Windschatten bildet. Dennoch sind die ersten Ergebnisse vielversprechend und zeigen gute Tendenzen. Damit kann eine Empfehlung ausgesprochen werden, dieses Verfahren weiterzuverfolgen.

4.2 Ausblick

In dieser Arbeit konnten kontinuierlich neue Erfahrungen gesammelt werden. Diese hielten durch eine ständige Anpassung Einzug in den Versuchsstand und den Versuchsablauf. Dennoch konnten nicht alle wichtigen Aspekte und Einflussfaktoren untersucht werden. Auch konnten nicht alle optimierbaren Stellen des Vorganges und der Gerätschaft umgesetzt werden. Hier muss dringlich weiter nachgebessert werden, um dieses vielversprechende Projekt fortzuführen.

Ein paar Anregungen zur Verbesserungen der Zentrifuge, die sich in dieser Arbeit gezeigt haben, sind die Reduzierung des Luftwiderstandes. Dies könnte durch eine Art Ring, welcher das Zentrum mit dem Gegengewicht und der Wurzel umgibt, sein. Die Luft wird an der Stelle verdrängt und der Widerstand beschränkt sich überwiegend auf den Reibungswiderstand der Grenzschicht des Ringes. Zur Untersuchung tieferer Temperaturen ist die Optimierung der Zentrifuge auf höhere Drehzahlen unabdingbar. Die Versuche konnten nur durch zusätzliche Messhardware durchgeführt werden. Eine sinnvolle Erweiterung des Leitstands wäre die Möglichkeit Messungen mit höheren Frequenzen durchführen zu können. Dies würde eine Systemintegration erleichtern und die Umsetzung späterer Projekte zusätzlich erleichtern.

Eine weitere Überlegung ist, dass die Kante des Versuchsträgers, auf dem das Eis angefroren wird, einen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Das Eis befindet sich in direkter Verlängerung der Stirnflächen des Trägers und hat somit direkten Kontakt mit der Kante. Diese ist zurzeit nicht definiert. Das bedeutet, dass sich kleinste Haken bilden könnten, an denen sich das Eis abstützt oder ringsherum friert. Dies kann eventuell untersucht werden oder eine genau definierte Bearbeitung der Kante vorherrschen, damit die Bedingungen identisch sind.

Die Versuche zeigten zudem eine Erhöhung der Lufttemperatur in der Kammer der Zentrifuge. Daraus lässt sich schließen, dass die Temperatur des Rotors mit ansteigt.

Ist dies der Fall, muss untersucht werden, inwieweit der Wärmefluss die Fläche auf der das Eis angefroren ist, beeinflusst.

Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] W. F. P. Tries, *Vorhersage der Vereisung - erneut aktuell!*, Deutscher Wetterdienst, 1981.
- [2] W. C. Hinds, *Aerosol Technology: properties, behavior and measurement of airborne particles*, New York: John-Wiley & Sons, Inc., 1999.
- [3] M. P. Goertz, X. -Y. Zhu und J. E. Houston, „Exploring the Liquid-like Layer on the Ice Surface,“ American Chemical Society, Minneapolis, Minnesota; Albuquerque, New Mexico, 2009.
- [4] P. D. H. Rinne, *Taschenbuch der Statistik*, Frankfurt am Main: Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch GmbH, 2008.
- [5] . B. Stutz, „Summative und Formative Evaluation,“ Universitdt des Saarlandes FR 5.5 - Informationswissenschaften, Saarbrücken, 2005.
- [6] C. Laforte und A. Beisswenger, „Icephobic Material Centrifuge Adhesion Test,“ Université du Québec à Chicoutimi, Montréal, 2005.
- [7] E. W. Brouwers, A. A. Peterson und e. al., *Ice Adhesion Strength Measurements for Rotor Blade Leading Edge Materials*, Virginia Beach, VA, USA: American Helicopter Society International, Inc., 2011.
- [8] S. Geier, M. Schulz, M. Sinapius und M. Skrowny, „Evaluierung unterschiedlicher Enteisierungssysteme zum Einsatz an einer flexiblen Flügelvorderkante,“ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrttechnik e.V. (DLR), Braunschweig, 2013.

Anhang

Anhang

Tabeklle A1: Gewicht der Probenträger

Gewicht Träger 1:	21,219	
Gewicht Träger 2:	21,847	
Gewicht Träger 3:	21,125	
Gewicht Träger 4a:	19,006	10mm breit
Gewicht Träger 4b:	18,895	10mm breit
Gewicht Träger 5:	22,208	

Tabelle A2: Zugversuch

Datum	Zeit	Max. Kraft [N]	abgelöste Fläche [m²]	normierte Kraft	Kraft pro Fläche	Temperatur	Bemerkung
15.04.2015	10:29	25				-6,5°C	Einstellungen falsch
	10:59	48	0,00006521	73,4284619	734.285	-6,2°C	
	12:42	36	0,00005705	62,2685364	622.685	-5,5°C	
	13:07	64	0,00006541	97,2865005	972.865	-6,7°C	
	14:07	43				-6,9°C	kein Foto nach Ablösen
	14:57	29				-8°C	3 Peaks
	15:35	30				-7,9°C	2 Peaks

Tabelle A3: Statisch aufgefrorenes Eis

Datum	Uhrzeit	Proben-träger	Temp. Aufsprühen	Temp. Lösen	Temp. Zentrifuge	Gewicht Gesamt [g]	Gewicht Eis [g]	Messpunkt Peek	Drehzahl	G Wert (max. gemessene)/CH	Kraft	Kraft/Masse	Bemerkungen
13.04.2015	14:57	5	-10°C	-9,8°C	-6,7°C -> -4,8°C	22,582	0,374	1467684	3588,1	1542,5	13,20072924	35,29606749	nicht Wertbar da zuerst zu hoch
										1	0	0	
											0	0	
	15:29	5	-10°C	-8,7°C	-7,4°C -> -3,2°C	22,485	0,277	1891300	4800,4	793	17,49975094	63,17599618	drittes Feld
										2	0	0	normiert auf die Fläche
											19,93642507	71,9726537	
	15:53	5	-10°C	-8,9°C	-7,3°C -> -3,0°C	22,448	0,24	2018967	4915,8	2072,9	15,89999167	66,2499653	
										2	0	0	
											0	0	
	16:18	5	-10°C	-9,7°C	-8°C -> -3°C	22,479	0,271	1997977	5001	1078,8	18,58147753	68,56633776	
										3	0	0	
	16:46	5	-10°C	-9,5°C	-7,5°C -> -2,7°C	22,488	0,28	1947102	4886,7	7673,7	18,33102003	65,46792869	
										1	0	0	
											0	0	
										Mittelwert:	17,57806004		
										Standardabw.:	1,048313071		
										Mittelw. P2 norm.:	18,18722858		
										St.-abw. P2 norm.:	1,454926912		
										Mittelwert: N=3	17,60416308	8,802081539	
										St.-abw. : N=3	1,209361369	0,604680684	

Tabelle A4: Dynamisch aufgefrorenes Eis (10.04.2015)

Datum	Uhrzeit	Proben-träger	Temp. Aufsprühen	Temp. Lösen	Temp. Zentrifuge	Luft-geschwindigkeit	Gefrierzeit @5Bar [s]	Gewicht Gesamt [g]	Gewicht Eis [g]	Messpunkt Peak	Drehzahl	G Wert (max. gemessene)	Kraft	Kraft/Masse	Bemerkungen
10.04.2015 (großes Grundrauschen)	10:12	4a	-15°C	-13°C		36m/s (80%)	30sec	19,163	0,157	2452757	5902,2		14,99424976	95,50477553	
	10:30	4a	-15°C	-13°C		36m/s (80%)	25sec	19,168	0,162						
	10:52	4a	-15°C	-13°C		36m/s (80%)	25sec	19,16	0,154	2405541	5968		15,81866716	97,64609356	
	11:09 (11:07)	4a	-15°C	-13°C		36m/s (80%)	25sec	19,153	0,147	2419866	5980,1		15,09853667	98,04244594	
	12:45	4a	-15°C	-13°C		36m/s (80%)	25sec	19,158	0,152	2151633	5430,8		11,88617713	80,85834785	kein Lösen beim ersten Durchgang
	13:21	4b	-15°C	-12,5°C		36m/s (80%)	25sec	19,048	0,153	1734407	4376,2		7,980592876	52,5039005	großer Ausreißer...
	13:39	4b	-15°C	-12,5°C		36m/s (80%)	25sec	19,053	0,158	1844788	4672,5		9,157718626	59,8543701	
	13:51	4b	-15°C	-13,8°C		36m/s (80%)	25sec	19,046	0,151	2206029	5459,1		12,90911385	81,70325225	
	14:03	4b	-15°C	-14,3°C		36m/s (80%)	25sec	19,059	0,164	2295624	5744,7		13,66183072	90,4757001	
	14:27	4b	-10°C	-9,6°C		36m/s (80%)	30sec	19,048	0,153	2330785	5867,3		15,4781012	94,3786587	
	14:38	4b	-10°C	-9,5°C		36m/s (80%)	25sec	19,043	0,148	2113724	5605,2		13,17864933	86,13496296	
	14:50	4b	-10°C	-9,5°C		36m/s (80%)	25sec	19,043	0,148	2130972	5418,1		11,91113077	80,48061333	
	15:03	4b	-10°C	-9°C		36m/s (80%)	25sec	19,027	0,132	2086036	5344,6		11,59015849	78,31188167	
	15:14	4b	-10°C	-9,2°C		36m/s (80%)	25sec	19,038	0,143	1973743	5186,2		9,733514888	73,73874915	
	15:24	4b	-10°C	-9°C		36m/s (80%)	25sec	19,036	0,141	2017895	5175,1		10,49955214	73,42344153	
										1957362	5131,1		10,17741103	72,1802201	

Tabelle A5: Dynamisch aufgefrorenes Eis (13.04.2015 und 15.04.2015)

Datum	Uhrzeit	Proben-träger	Temp. Aufsprühen	Temp. Lösen	Temp. Zentrifuge	Luft-geschwindigkeit	Gefrierzeit @5Bar [s]	Gewicht Gesamt [g]	Gewicht Eis [g]	Messpunkt Peek	Drehzahl	G Wert (max. gemessene)	Kraft	Kraft/Masse	Bemerkungen
13.04.2015	11:07	4b	-19°C	-17,0°C		36m/s (80%)	25sec	19,032	0,137				0	0	
	11:33	4b	-14°C	-14,0°C		36m/s (80%)	25sec	19,026	0,131				0	0	
	13:10	4b	-14°C	-13,9°C		36m/s (80%)	25sec	19,021	0,126	2102267	5389,7		10,03452858	79,63911572	
	15:17	4b	-10°C	-9,2°C	-8,2°C -> -3,0°C	36m/s (80%)	25sec	19,043	0,148	2067827	5129,4		10,67559513	72,13239954	
	15:46	4b	-10°C	-10,1°C	-8,1°C -> -3,8°C	36m/s (80%)	25sec	19,038	0,143	2130187	5226,6		10,70956449	74,89205936	
	16:09	4b	-10°C	-9,9°C	-7,9°C -> -3,3°C	36m/s (80%)	25sec	19,018	0,123	1882027	4743,8		7,588485307	61,6950025	
	16:38	4b	-10°C	-9,2°C	-7,9°C -> -3,2°C	36m/s (80%)	25sec	19,041	0,146	2060263	5117,2		10,48129351	71,78968158	
	10:17	4b	-7°C	-7,1°C	-7°C -> -3°C	36m/s (80%)	25sec	19,026	0,131	2186123	5325		10,18375082	77,73855592	
	10:49	4b	-7°C	-7°C	-6,1°C -> -1,7°C	36m/s (80%)	25sec	19,013	0,118	1982675	4941		7,897851429	66,93094431	
	11:15	4b	-9,5°C	-6,8°C	-6,2°C -> -1,2°C	36m/s (80%)	25sec	19,059	0,164	1940297	4855,2		10,59876692	64,62662757	
15.04.2015	12:57	4b	-9,5°C	-6,8°C	-5,6°C -> -1,7°C	36m/s (80%)	25sec	19,01	0,115	1958967	4950,7		7,727309458	67,19399529	
	13:54	4b	-9,5°C	-7,1°C	-6°C -> -1,4°C	36m/s (80%)	25sec	19,043	0,148	1930873	4902,5		9,752010601	65,89196352	
	14:25	4b	-9,5°C	-6,9°C	-6°C -> -1°C	36m/s (80%)	25sec	19,038	0,143	1945872	4864,5		9,277045733	64,87444569	
	14:47	4b	-9,5°C	-7,7°C	-6,5°C -> -1,6°C	36m/s (80%)	25sec	19,041	0,146	1951146	4936,6		9,754521677	66,81179231	
	15:11	4b	-9,5°C	-8,1°C	-7,2°C -> -2°C	36m/s (80%)	25sec	19,047	0,152	1983015	5061,3		10,67492894	70,22979568	
													0	0	
													0	0	

Tabelle A6: Vorversuche (23.03.2015 und 26.03.2015)

Datum	Uhrzeit	Proben-träger	Temp. Aufsprühen	Temp. Lösen	Temp. Zentrifuge	Luft-geschwindigkeit	Gefrierzeit @5Bar [s]	Gewicht Gesamt [g]	Gewicht Eis [g]	Messpunkt Peak	Drehzahl	G Wert (max. gemessene)	Kraft	Kraft/Masse	Bemerkungen
23.03.2015	15:42	1	-9°C			36m/s (80%)	60 sec	21,681	0,462	1902290	5375,8	-1738,1	36,60373699	79,22886793	
												1	0	0	
	16:12	1	-10°C			36m/s (80%)	40 sec	21,627	0,408	2146241	5946,2		39,54908433	96,93403023	
													0	0	
	16:30	1	-10°C			36m/s (80%)	30 sec	21,518	0,299	1956085	5537,6	1577,3	25,13689302	84,06987632	
26.03.2015												1	0	0	
	16:40	1	-10°C			36m/s (80%)	30 sec	21,493	0,274	1984712	5574,9	-864	23,34651012	85,20624133	
												1	0	0	
	16:50	1	-10°C			27m/s (60%)	30 sec	21,36	0,141	1845270	5259,3	929	10,69232735	75,83210883	Windgeschwindigkeit 60%
												2	0	0	
	15:43	2	-10°C			36m/s (80%)	30 sec	22,079	0,232		5682,6		20,53900514	88,53019455	
													0	0	
	16:01	2	-10°C			36m/s (80%)	40 sec	22,109	0,262		5710,3		23,42159065	89,39538417	
													0	0	
	16:23	2	-10°C			36m/s (80%)	50 sec	22,134	0,287				22,57519961	88,53019455	Datensätze beschädigt
													0	0	
	16:50	2	-10°C			36m/s (80%)	50 sec	22,102	0,255		5682,6		0	0	
													0	0	
	17:07	2	-10°C			36m/s (80%)	50 sec	22,123	0,276				0	0	Datensätze beschädigt
													0	0	
	17:20	2	-10°C			36m/s (80%)	20 sec	22,019	0,172		5778		15,74275608	91,52765164	
													0	0	
	17:36	2	-10°C			36m/s (80%)	20 sec	22,031	0,184		5745,1		16,64984721	90,48830008	
													0	0	
	17:58	3	-10°C			36m/s (80%)	20 sec	21,316	0,191		5674,8		16,86287932	88,28732629	
													0	0	

Tabelle A7: Vorversuche (27.03.2015)

Datum	Uhrzeit	Proben-träger	Temp. Aufsprühen	Temp. Lösen	Temp. Zentrifuge	Luft-geschwindigkeit	Gefrierzeit @5Bar [s]	Gewicht Gesamt [g]	Gewicht Eis [g]	Messpunkt Peek	Drehzahl	G Wert (max. gemessene)	Kraft	Kraft/Masse	Bemerkungen
27.03.2015	09:54	3	-5°C			36m/s (80%)	20 sec	21,308	0,183		5607,8		15,77732483	86,21488976	
	10:08	3	-5°C			36m/s (80%)	20 sec	21,291	0,166		5028		11,50524499	69,30870473	
	10:24	2	-6°C			27m/s (60%)	20 sec	21,99	0,143		4801		9,036425949	63,19178985	
	10:41	2	-6°C			36m/s (80%)	30 sec	21,918	0,071		4691,8		4,284839661	60,34985437	60% windkanal
	10:56	2	-6°C			36m/s (80%)	30 sec	22,056	0,209		4661,6		12,45126685	59,57543948	breite 7,9 mm
	11:19	2	-15°C			36m/s (80%)	30 sec	22,099	0,252		4571		14,43511433	57,28219973	
	11:32	2	-15°C			36m/s (80%)	30 sec	22,132	0,285		4657,7		16,95060211	59,47579686	
	11:50	2	-15°C			36m/s (80%)	20 sec	22,018	0,171		4711,2		10,40534388	60,84996423	1te messung kein lösen

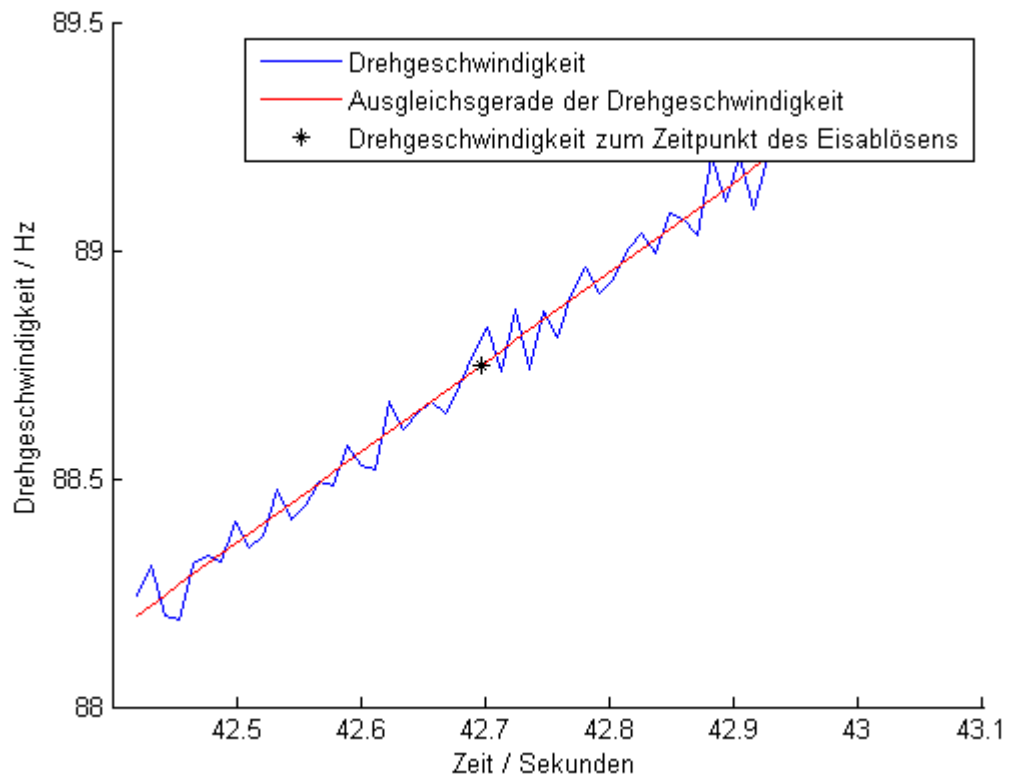


Abbildung A1: Drehgeschwindigkeit/Ausgleichsgerade (15.03.2015, 10:17)

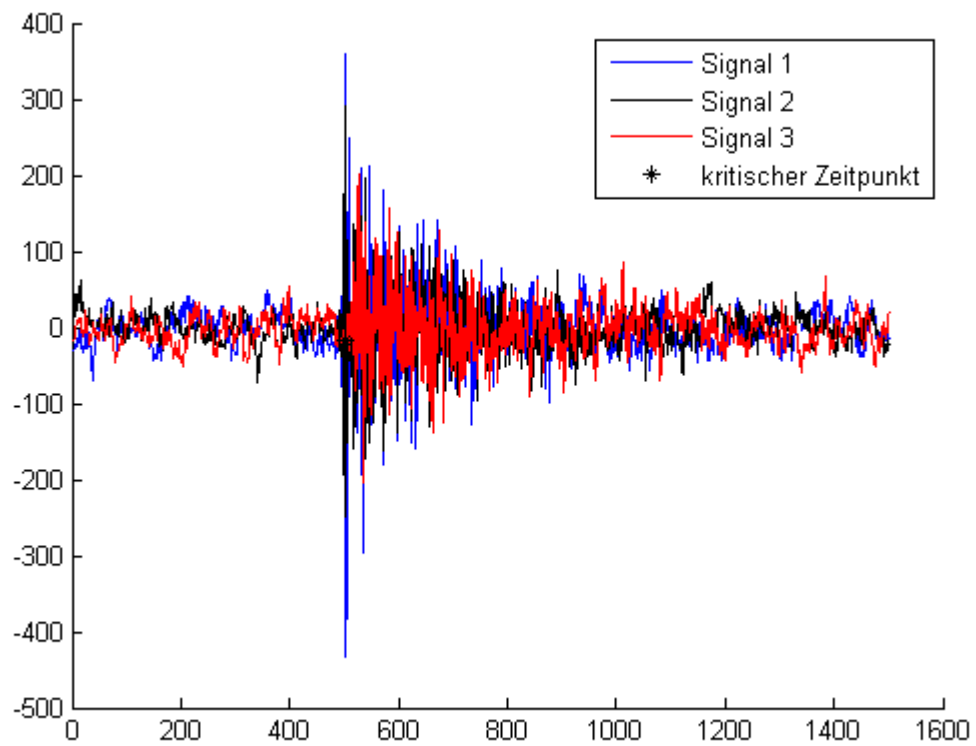


Abbildung A2: Sensordaten der Beschleunigung beim Lösen (15.03.2015, 10:17)

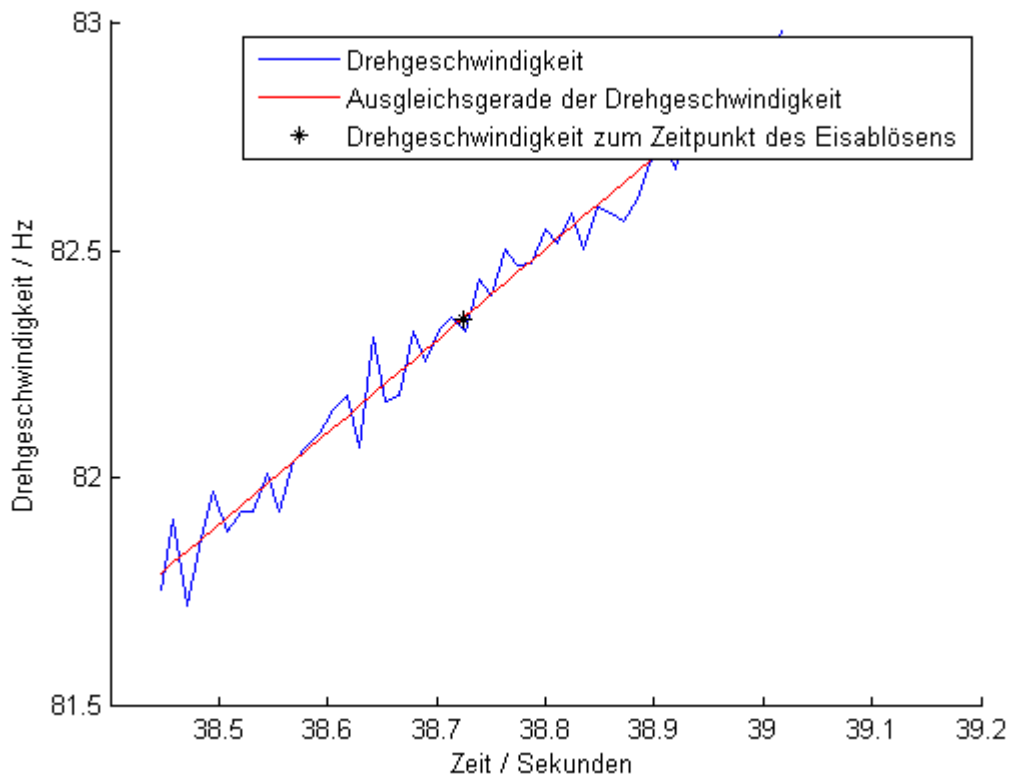


Abbildung A3: Drehgeschwindigkeit/Ausgleichsgerade (15.03.2015, 10:49)

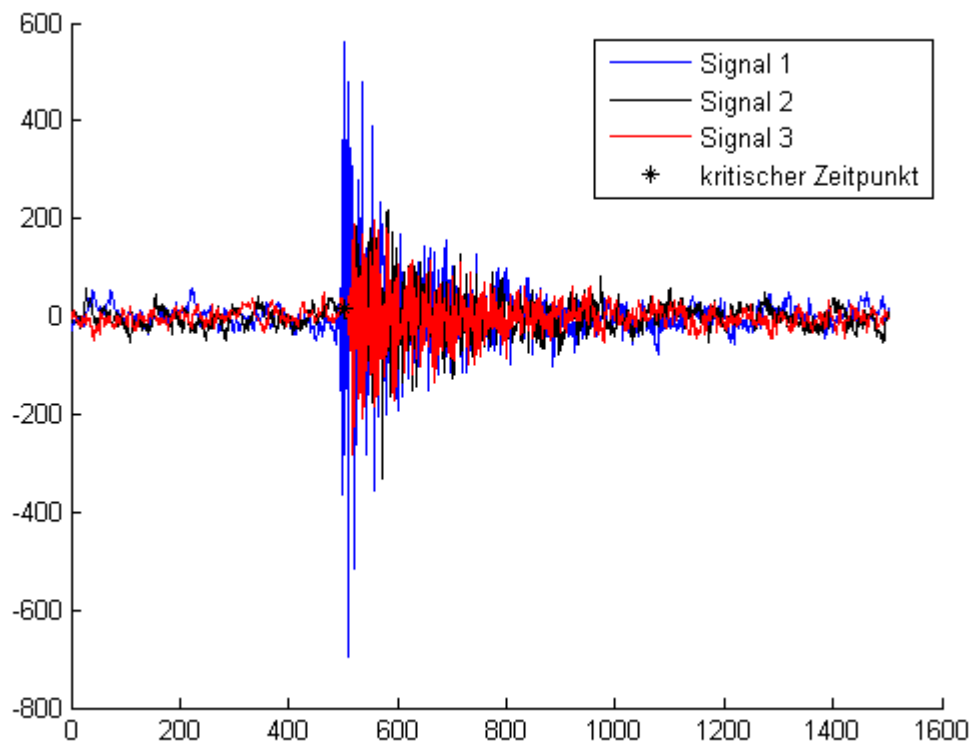


Abbildung A4: Sensordaten der Beschleunigung beim Lösen (15.03.2015, 10:49)

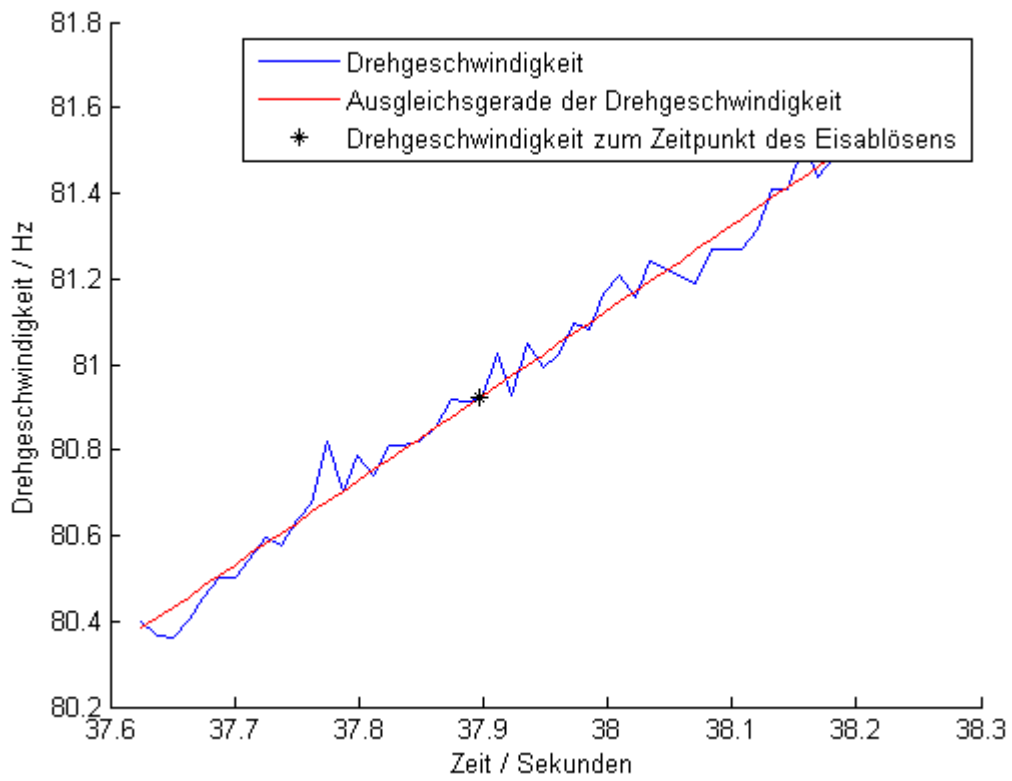


Abbildung A5: Drehgeschwindigkeit/Ausgleichsgerade (15.03.2015, 11:15)

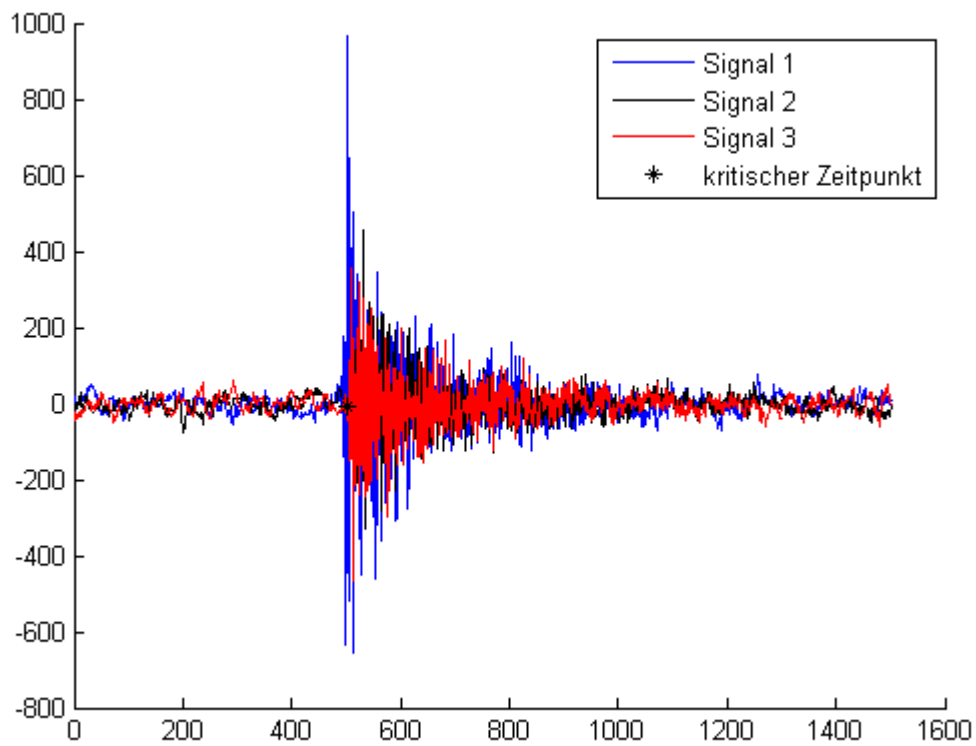


Abbildung A6: Sensordaten der Beschleunigung beim Lösen (15.03.2015, 11:15)

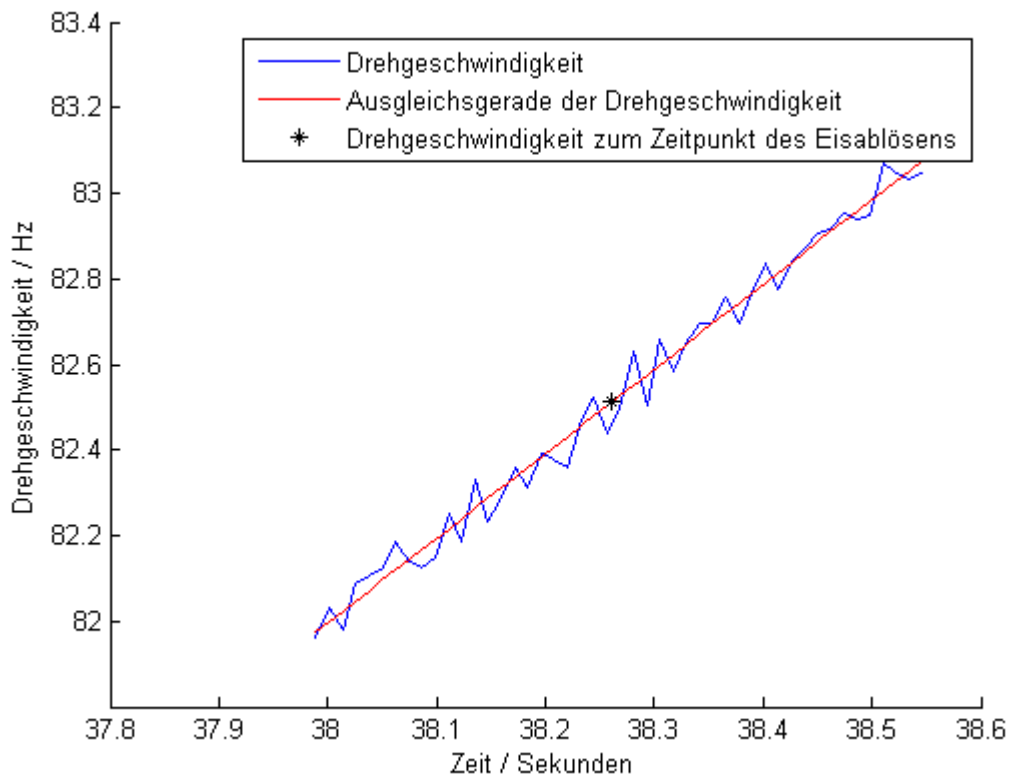


Abbildung A7: Drehgeschwindigkeit/Ausgleichsgerade (15.03.2015, 12:57)

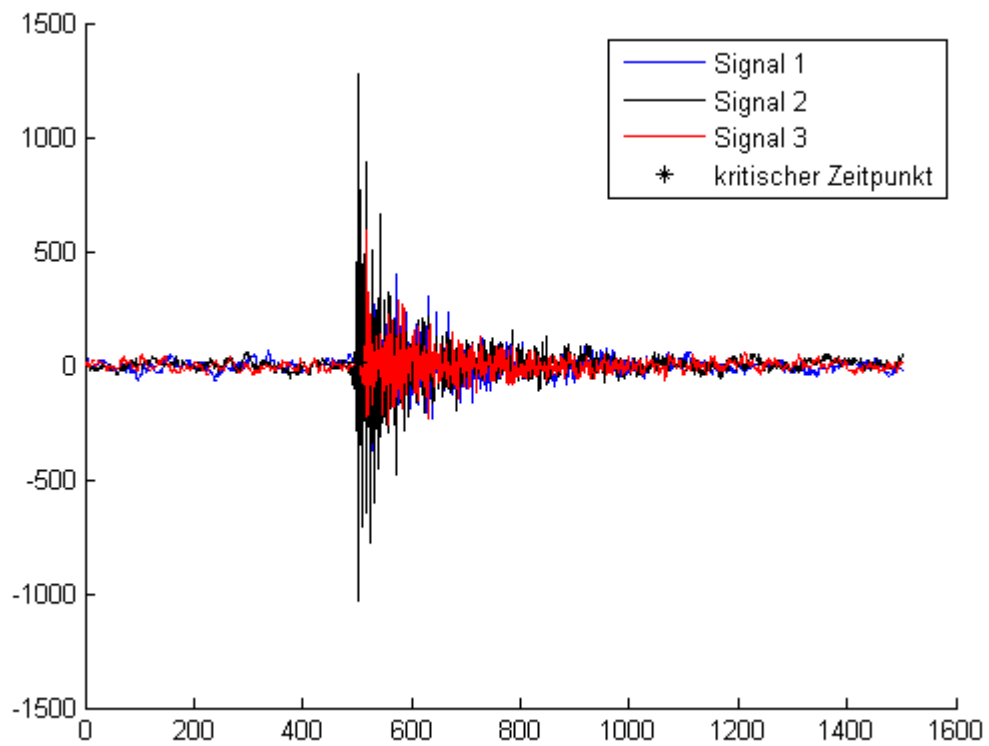


Abbildung A8: Sensordaten der Beschleunigung beim Lösen (15.03.2015, 12:57)

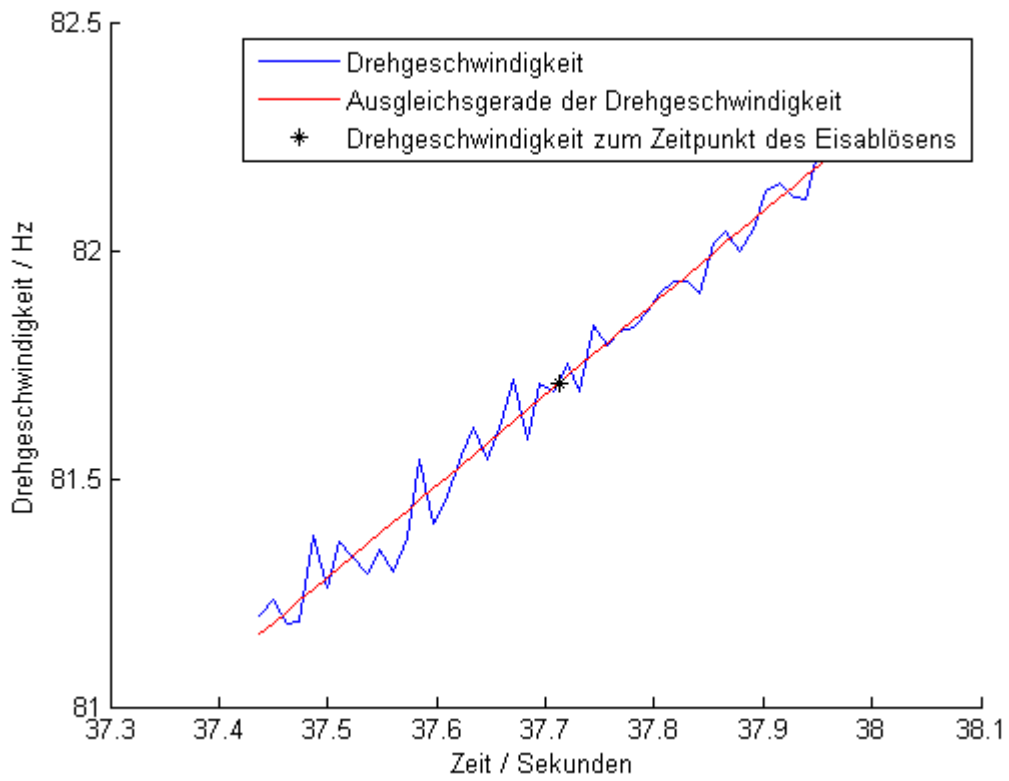


Abbildung A9: Drehgeschwindigkeit/Ausgleichsgerade (15.03.2015, 13:54)

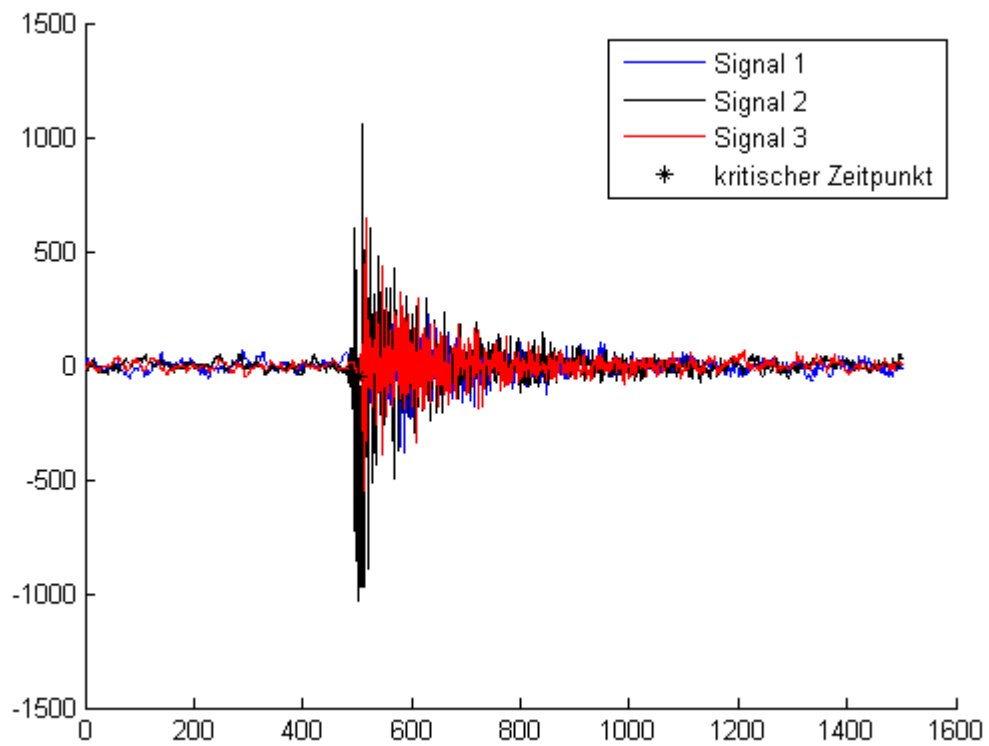


Abbildung A10: Sensordaten der Beschleunigung beim Lösen (15.03.2015, 13:54)

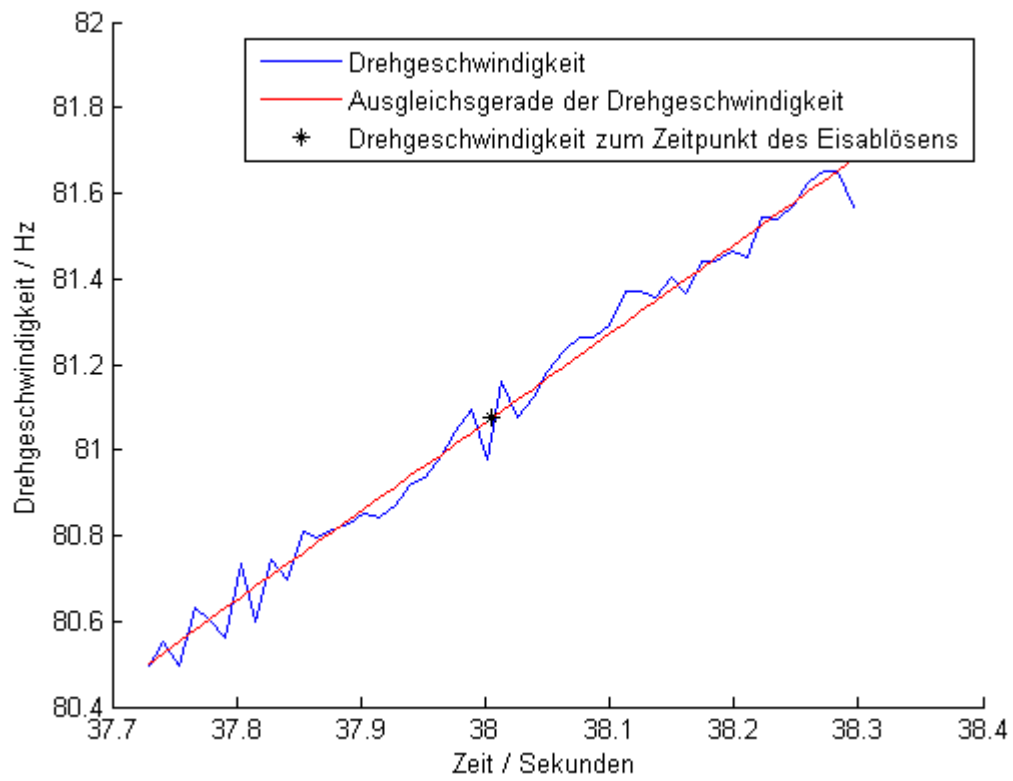


Abbildung A11: Drehgeschwindigkeit/Ausgleichsgerade (15.03.2015, 14:25)

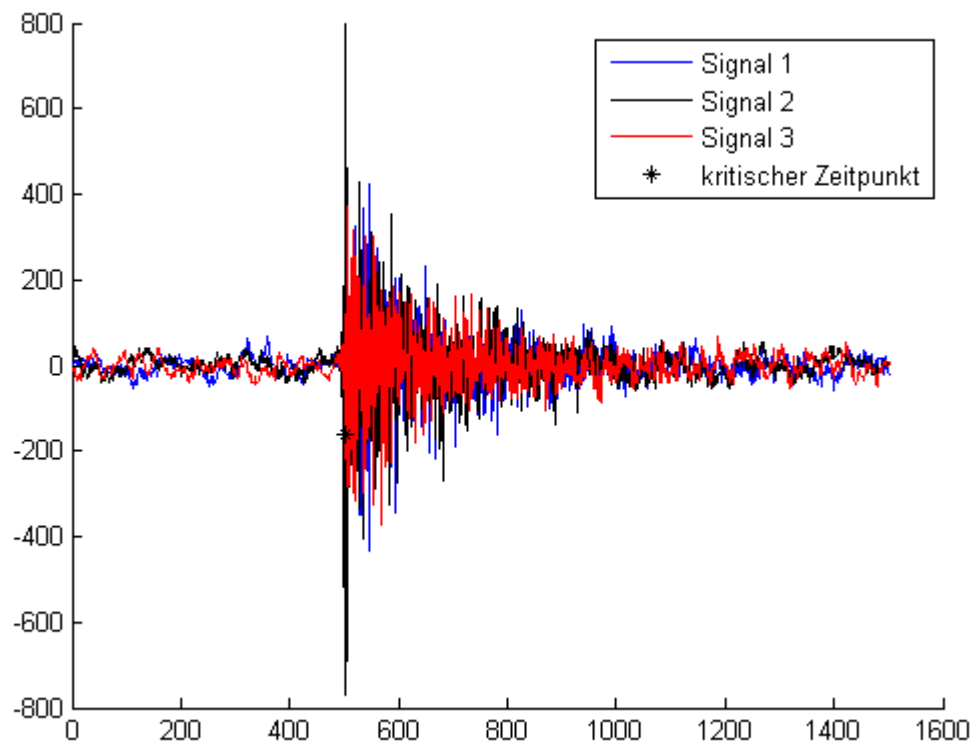


Abbildung A12: Sensordaten der Beschleunigung beim Lösen (15.03.2015, 14:25)

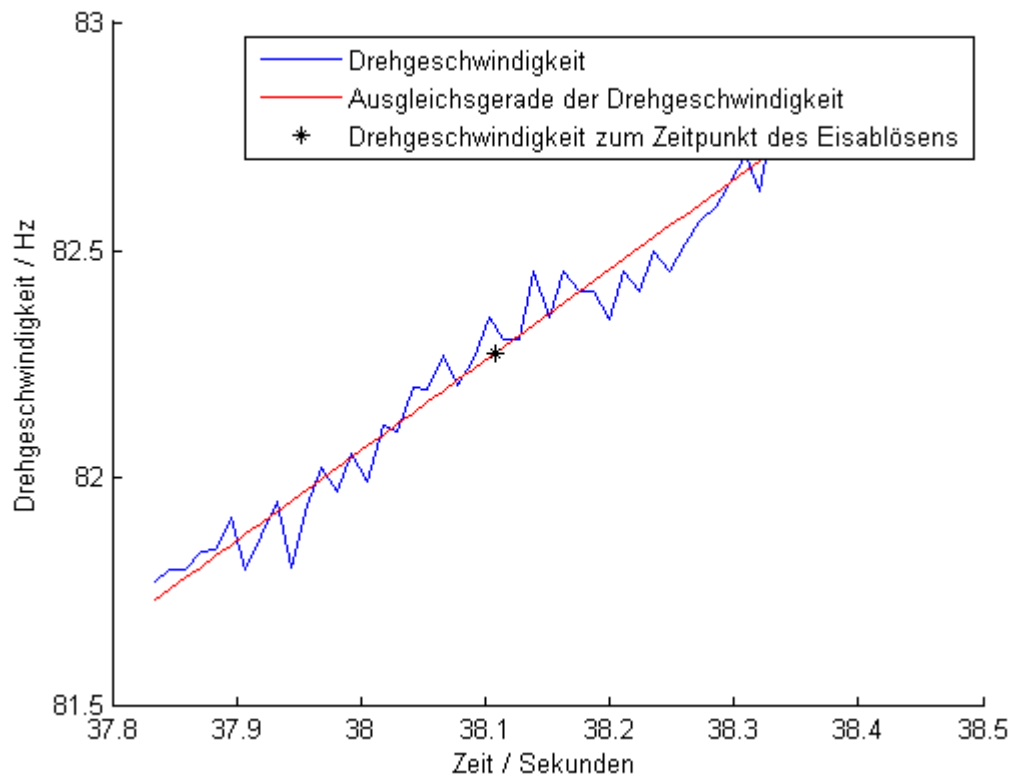


Abbildung A13: Drehgeschwindigkeit/Ausgleichsgerade (15.03.2015, 14:47)

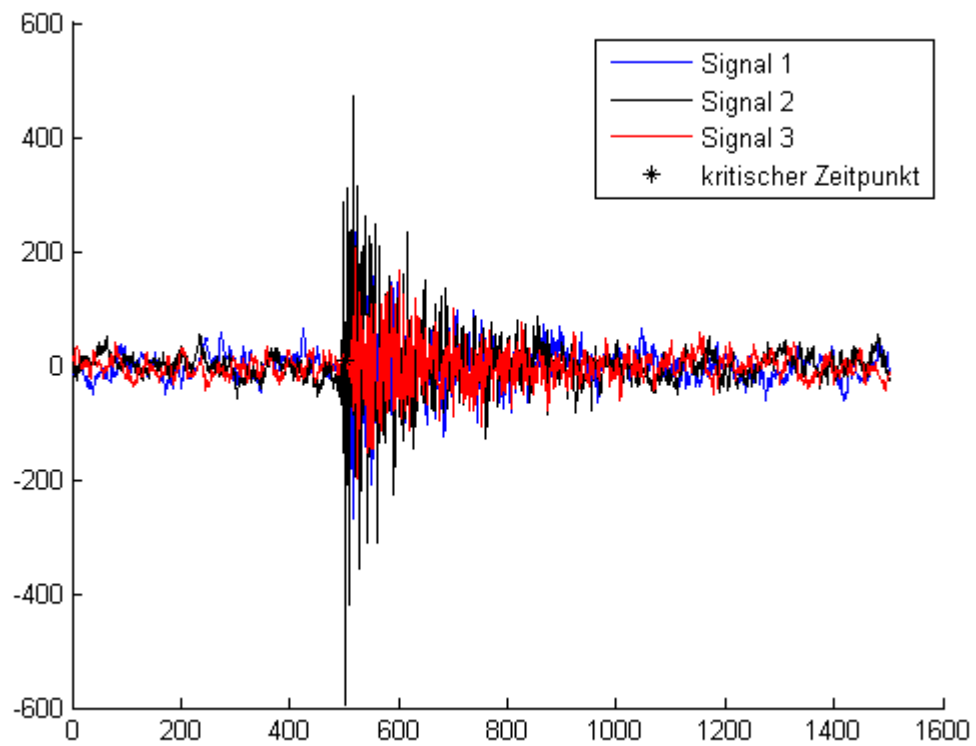


Abbildung A14: Sensordaten der Beschleunigung beim Lösen (15.03.2015, 14:47)

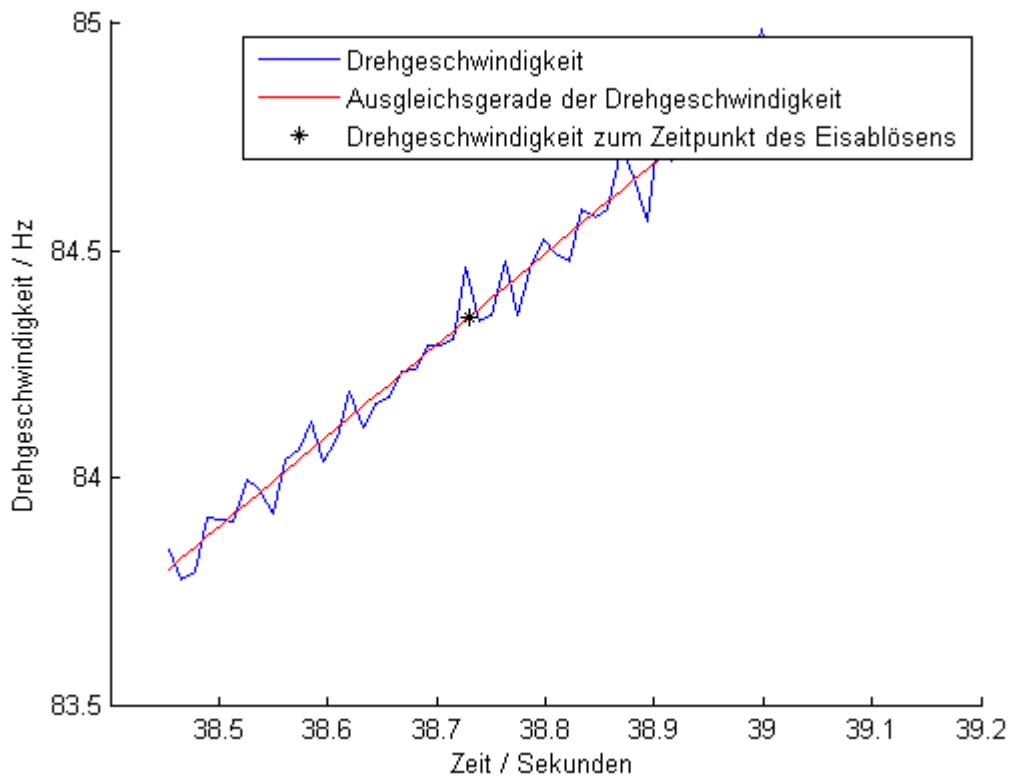


Abbildung A15: Drehgeschwindigkeit/Ausgleichsgerade (15.03.2015, 15:11)

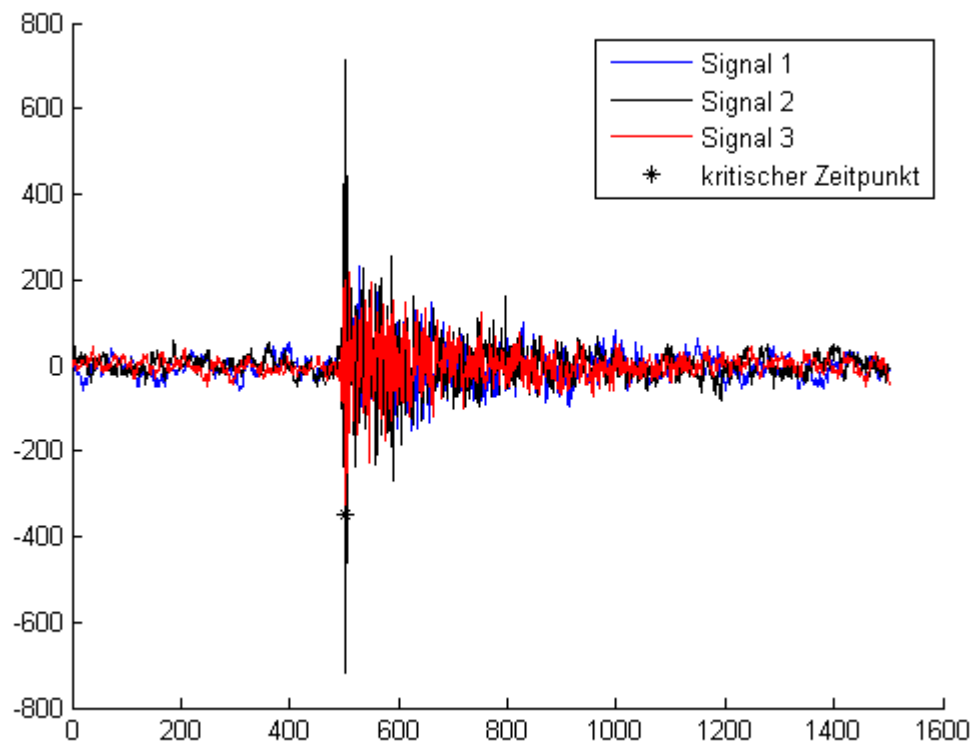


Abbildung A16: Sensordaten der Beschleunigung beim Lösen (15.03.2015, 15:11)

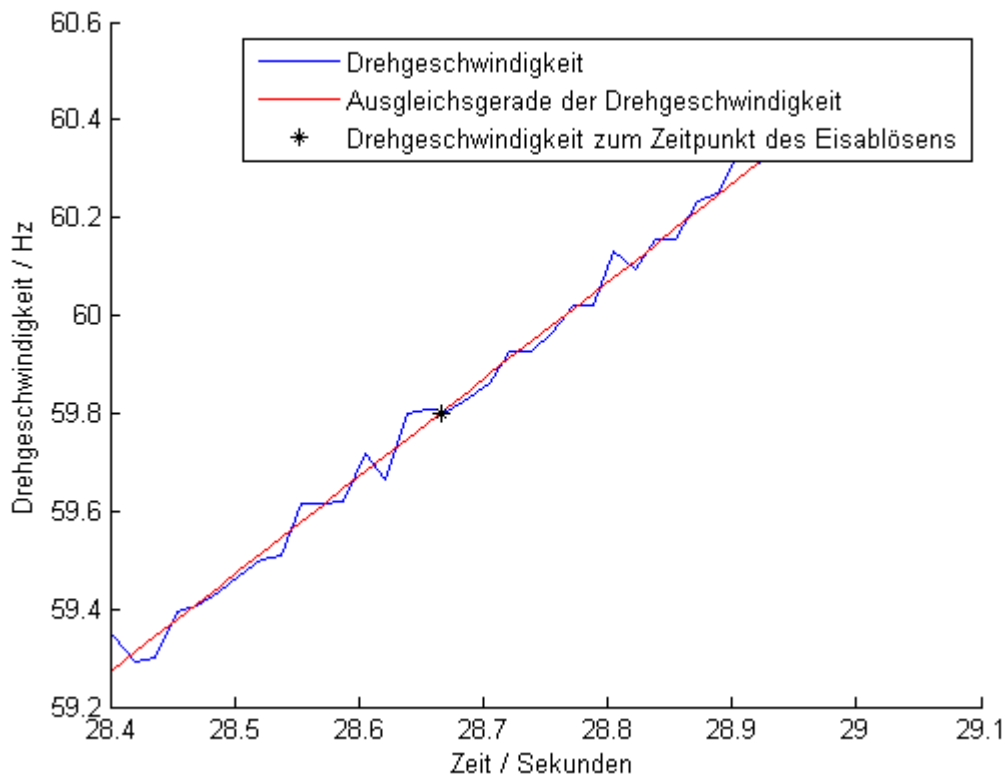


Abbildung A17: Drehgeschwindigkeit/Ausgleichsgerade (13.03.2015, 14:57)

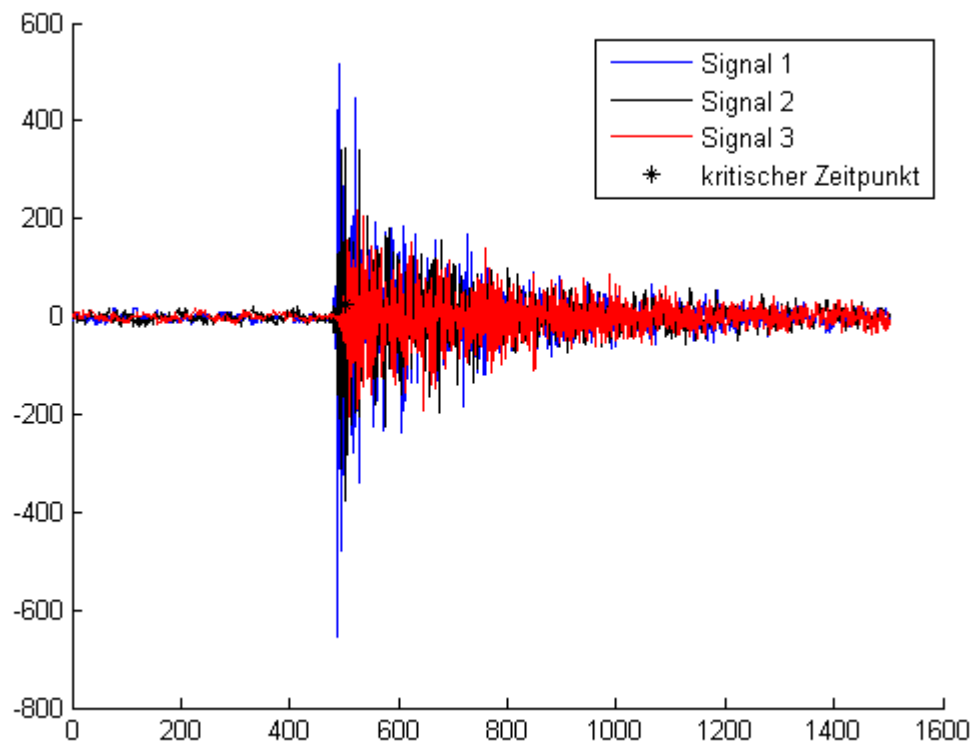


Abbildung A18: Sensordaten der Beschleunigung beim Lösen (13.03.2015, 14:57)

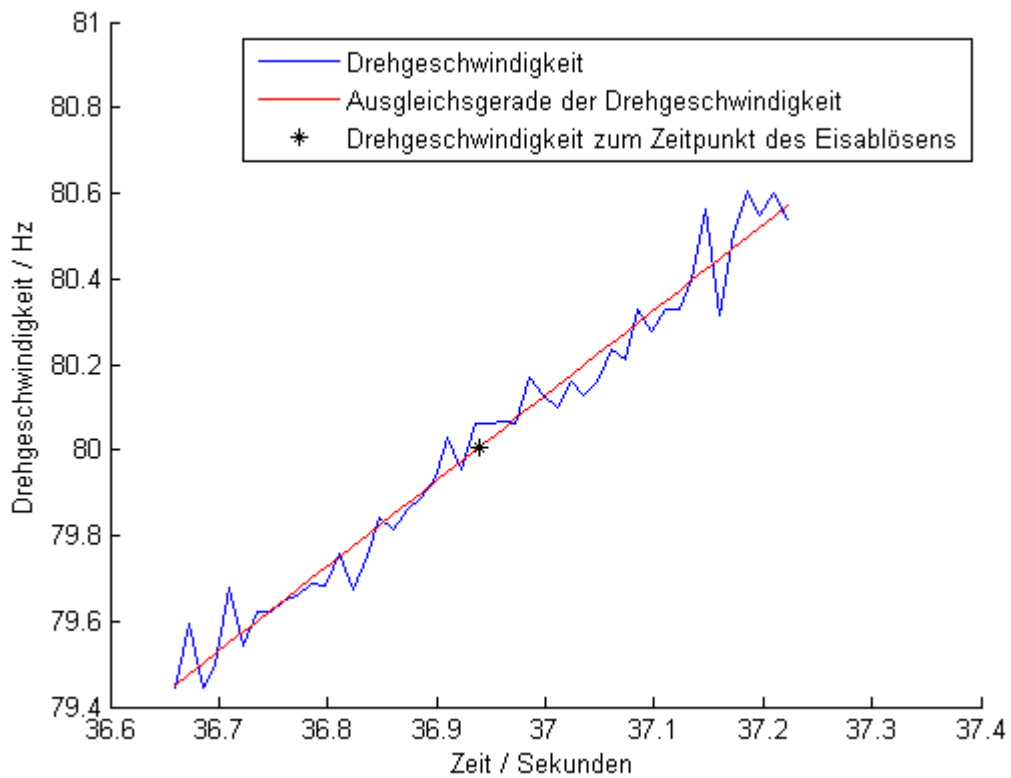


Abbildung A19: Drehgeschwindigkeit/Ausgleichsgerade (13.03.2015, 15:29)

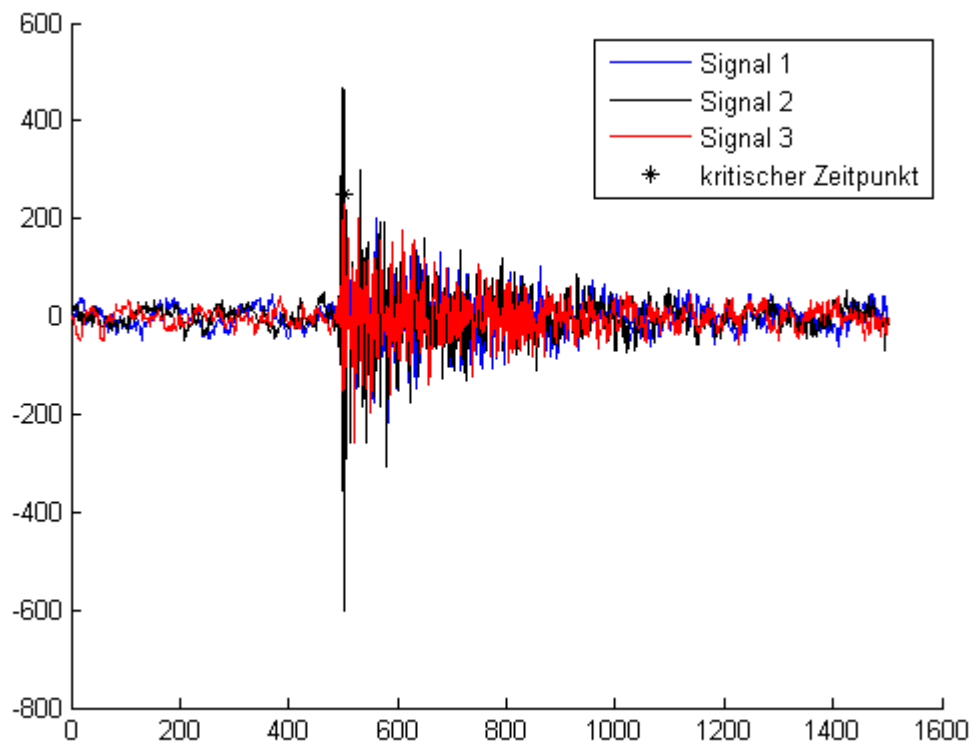


Abbildung A20: Sensordaten der Beschleunigung beim Lösen (13.03.2015, 15:29)

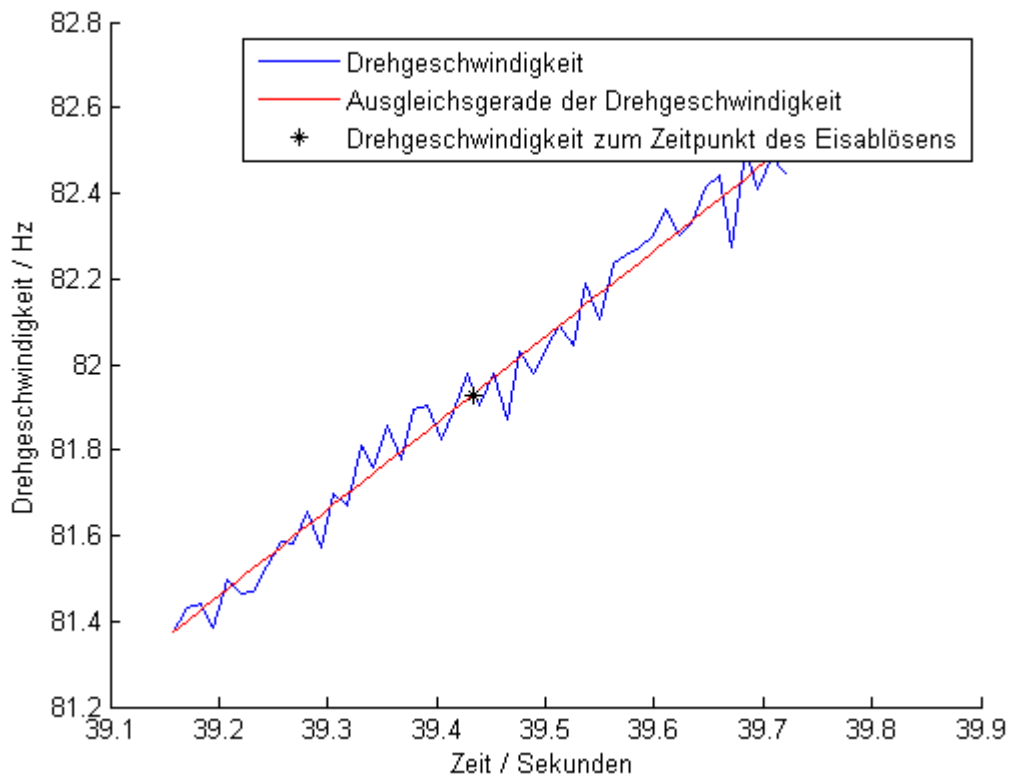


Abbildung A21: Drehgeschwindigkeit/Ausgleichsgerade (13.03.2015, 15:53)

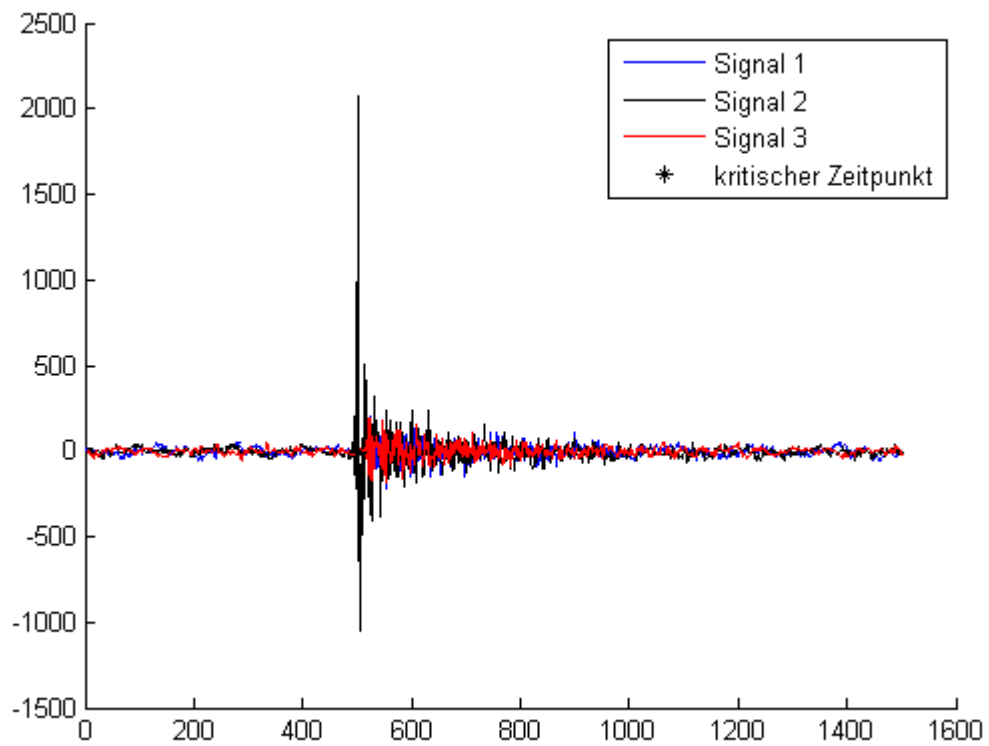


Abbildung A22: Sensordaten der Beschleunigung beim Lösen (13.03.2015, 15:53)

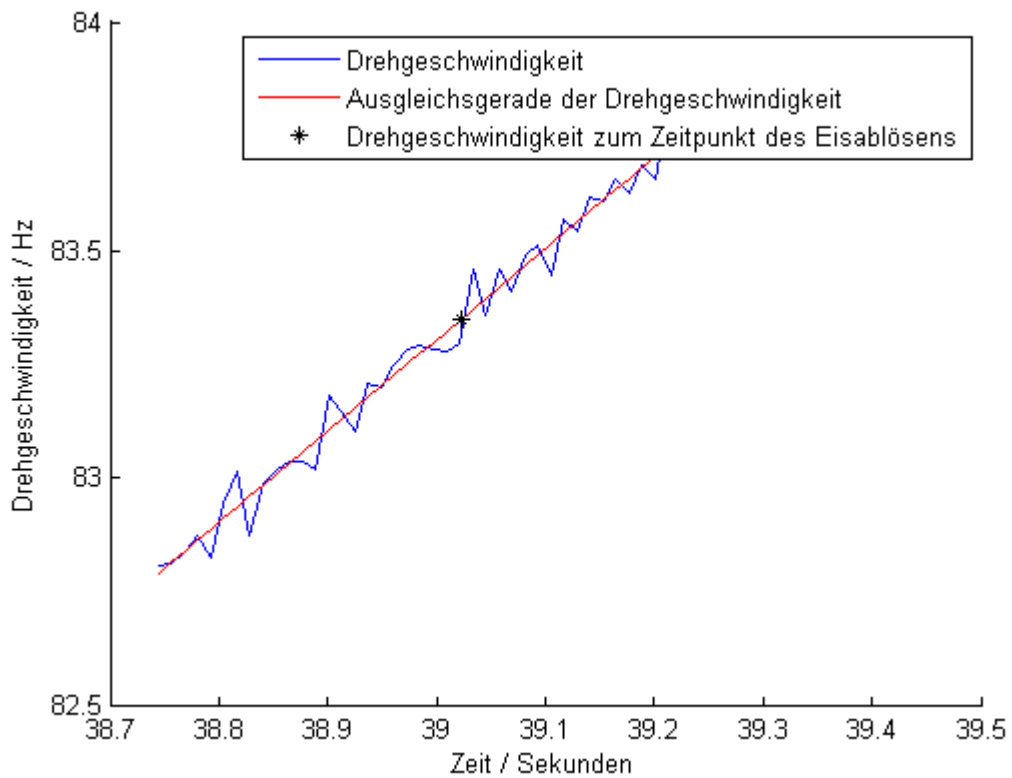


Abbildung A23: Drehgeschwindigkeit/Ausgleichsgerade (13.03.2015, 16:18)

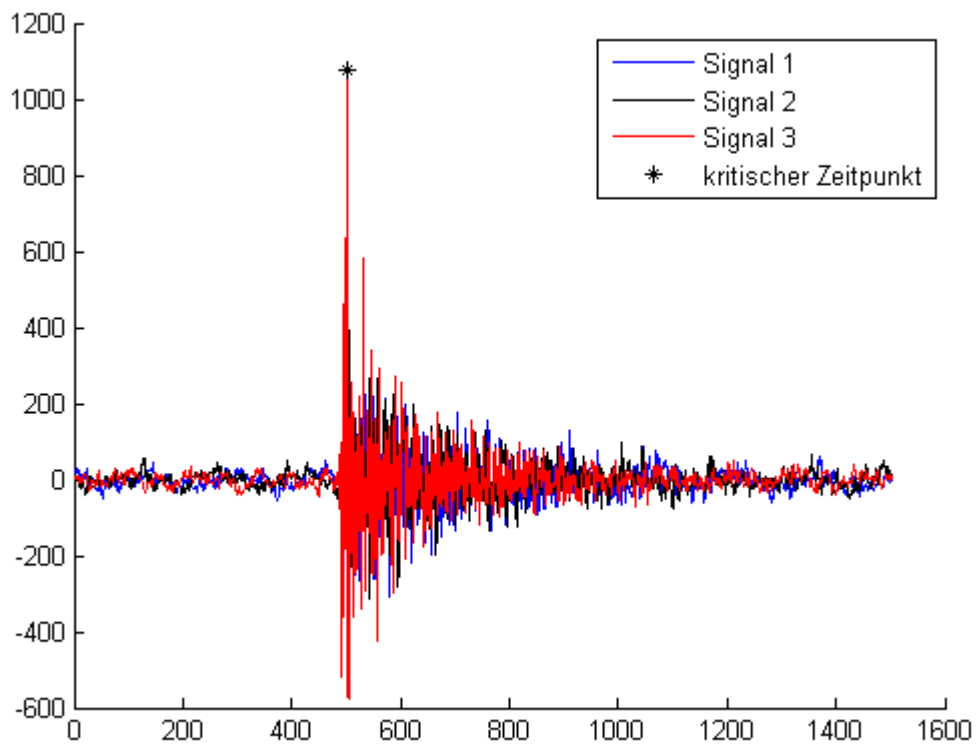


Abbildung A24: Sensordaten der Beschleunigung beim Lösen (13.03.2015, 16:18)

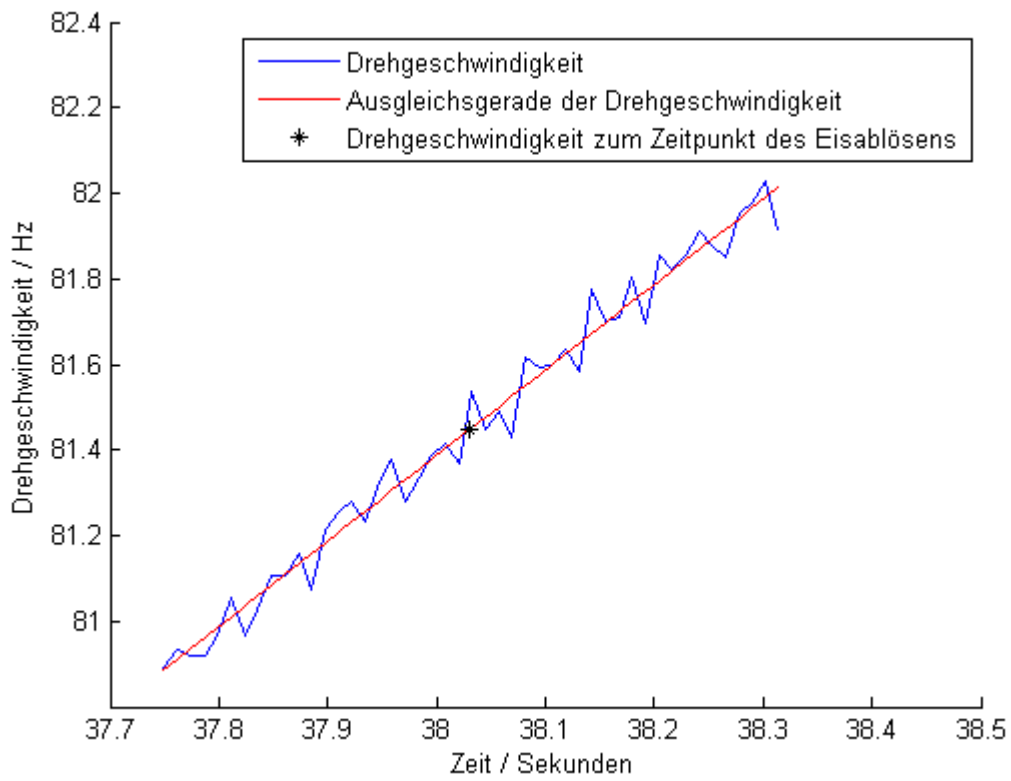


Abbildung A25: Drehgeschwindigkeit/Ausgleichsgerade (13.03.2015, 16:46)

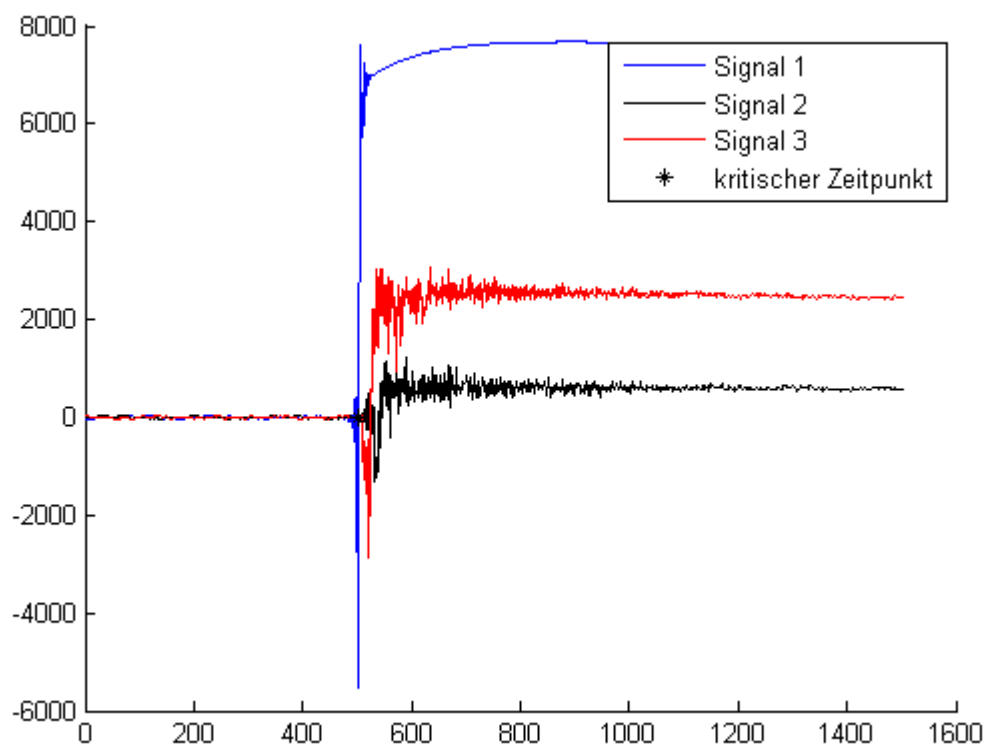


Abbildung A26: Sensordaten der Beschleunigung beim Lösen (13.03.2015, 16:46)

Weitere Diagramme und die Datensätze auf der beiliegenden DVD.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Studienarbeit „Genauigkeit und Wiederholbarkeit der Messung der Eisadhäsionsfestigkeit in einem Zentrifugenprüfstand“ selbstständig verfasst sowie die benutzten Quellen und Hilfsmittel vollständig angegeben habe und die Arbeit nicht bereits als Prüfungsart vorgelegen hat.

Braunschweig, den 28.04.2015

Marlon Skrowny, Kaiserstraße 46, 38100 Braunschweig